

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
ім. ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»
МЕХАНІКО-МАШИНОБУДІВНИЙ ІНСТИТУТ
КАФЕДРА КОНСТРУЮВАННЯ ВЕРСТАТІВ ТА МАШИН

«На правах рукопису»

УДК 62-97

«До захисту допущено»

Завідувач кафедри

О.В.Шевченко

(підпис)

(ініціали, прізвище)

“ ” _____ 2019 р.

Магістерська дисертація

зі спеціальності (спеціалізації) 133 Галузве машинобудування
(код і назва спеціальності)

на тему: Дослідження теплових деформацій на прикладі
мікрофрезерного верстата MF-70

Виконав: студент 2 курсу, групи _____
(шифр групи)

ЯХНО Антон Сергійович

(прізвище, ім'я, по батькові)

(підпис)

Науковий керівник доцент, канд. техн. наук, доцент

ДАНИЛЕНКО Олександр Васильович

(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали)

(підпис)

Консультант

(назва розділу)

(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали)

(підпис)

Рецензент

(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали)

(підпис)

Засвідчую, що у цій магістерській
дисертації немає запозичень з праць
інших авторів без відповідних посилань

Студент _____
(підпис)

Київ 2019

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут
імені Ігоря Сікорського»

Інститут/факультет МЕХАНІКО МАШИНОБУДІВНИЙ ІНСТИТУТ
(повна назва)

Кафедра КОНСТРУЮВАННЯ ВЕРСТАТІВ І МАШИН
(повна назва)

Рівень вищої освіти – другий (магістерський) за освітньо-професійною
(освітньо-науковою) програмою

Спеціальність (спеціалізація) 133 Галузве машинобудування
(код і назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри

_____ О.В.Шевченко
(підпис) (ініціали, прізвище)
« » _____ 2019 р.

Завдання

на магістерську дисертацію студенту

ЯХНО Антону Сергійовичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема дисертації **Дослідження теплових деформацій на прикладі**
мікрофрезерного верстата MF-70

науковий керівник дисертації ДАНИЛЕНКО Олександр Васильович, к.т.н., доцент
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом по університету від « » _____ 20 р. № _____

2. Строк подання студентом дисертації _____

3. Об'єкт дослідження мікрофрезерний верстат Proxxon MF70 (Німеччина)

4. Предмет дослідження (Вихідні дані – для магістерської дисертації за освітньо-професійною програмою) теплові деформації які виникають внаслідок
нагрівання шпиндельного вузла

5. Перелік завдань, які потрібно розробити: інформаційно-аналітичний аналіз
за напрямом тепловиділення і теплові деформації в металорізальних верстатах,
включаючи моделювання і експериментальні дослідження; розробка методик дослідження
нагрівання складових верстата та температурного переміщення інструмента; вибір
електронного обладнання, розробка і виготовлення засобів кріплення датчиків;

експериментальне визначення температури нагрівання, переміщень інструмента, моделювання теплових процесів у досліджуваному верстаті

6. Перелік графічного (ілюстративного) матеріалу: результати інформаційно-аналітичного дослідження теплових явищ, їх компенсації, методик дослідження та моделювання технічні характеристики MF70, експериментальний стенд; результати експериментів та моделювання; висновки по дисертації

7. Орієнтовний перелік публікацій апробація матеріалів роботи на конференціях з публікацією тез

8. Консультанти розділів дисертації *

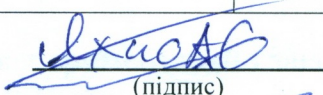
Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв

9. Дата видачі завдання _____

Календарний план

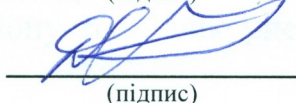
№ з/П	Назва етапів виконання магістерської дисертації	Строк виконання етапів магістерської дисертації	Примітка
1)	Вибір содпадишья	01.12.18 - 01.01.19	Висновок
2)	Розробка програмного забезпечення	01.01.19 - 15.02.19	
3)	Розробка критеріїв для даних	15.02.19 - 01.03.19	
4)	Моніторинг даних та електроніка	03.03.19 - 01.04.19	
5)	Проведення випробувань	02.04.19 - 01.05.19	
6)	Проведення експериментування	01.05.19 - 04.05.19	

Студент


(підпис)

А.С.Яхно
(ініціали, прізвище)

Науковий керівник дисертації


(підпис)

О.В.Даниленко
(ініціали, прізвище)

* Консультантом не може бути зазначено наукового керівника

Реферат

Дисертаційна робота складається із вступу, чотирьох розділів, загальних висновків, переліку використаних джерел і посилань із 19 найменувань. Обсяг дисертації – 102 сторінок. В роботу включено 53 рисунки, 4 таблиці, список використаних джерел літератури з 19 найменувань на 2 сторінках, додатки 2.

Мета роботи:

1. Уточнення закономірностей теплового процесу в технологічній системі малогабаритного верстату, який має конструктивні особливості і більш чутливий до втрати точності порівняно з верстатами середніх типорозмірів.
2. Розробка методики і експериментального дослідження теплового стану та відповідних деформацій шпиндельного вузла верстата Proxxon MF70.
3. Моделювання теплового стану верстату Proxxon MF70 з використанням експериментальних даних.

Актуальність теми. Підвищення ефективності механічної обробки є одним з вирішальних факторів для існування на світовому ринку багатьох компаній машинобудівного профілю. По даним вітчизняних та зарубіжних дослідників похибка механічної обробки на заключних стадіях виготовлення деталі, обумовлена тільки тепловими процесами в металорізальних верстатах, може досягати 70% сумарної, але порівняльні дослідження стосовно малогабаритних верстатів, які досить широко використовуються, в інформаційних джерелах відсутні.

Об’єкт дослідження – мікрофрезерний верстат Proxxon MF70 (Німеччина).

Предмет дослідження - тепловий процес в елементі технологічної системи – шпиндельному вузлі як в кінцевій ланці формоутворюючого ланцюга, що є чинником похибок.

Отримані і підтверджені експериментально закономірності теплової поведінки малогабаритного верстата пропонується використовувати для обґрунтування способу теплової стабілізації.

Ключові слова: *шпиндельний вузол, теплові деформації, малогабаритний верстат, передня та задня опори, температура, теплове поле.*

Die Kurzdarstellung

Die Masterarbeit besteht aus einer Einführung, vier Abschnitten, allgemeinen Schlussfolgerungen, einer Liste der verwendeten Quellen und Referenzen aus 20 Titeln. Der Umfang der Dissertation beträgt 102 Seiten. Die Arbeit enthält 53 Zeichnungen, vier Tabellen, eine Liste der verwendeten Literaturquellen aus 20 Titeln auf 2 Seiten und zwei Anhänge.

Zweck der Arbeit:

1. Klärung der Gesetzmäßigkeit des thermischen Prozesses im technologischen System einer kleinen Maschine, die konstruktive Merkmale aufweist und Genauigkeitsverlusten empfindlicher ist, als Werkzeugmaschinen mittlerer Größe.
2. Entwicklung der Methodik und experimentelle Untersuchung des thermischen Zustands und entsprechender Verformungen der Spindelbaugruppe des Proxxon MF70.
3. Modellierung des thermischen Zustands der Proxxon MF70-Maschine mit der Verwendung experimenteller Daten.

Aktualität des Themas. Die Effizienzsteigerung der Zerspanung ist einer der entscheidenden Faktoren für die Existenz vieler Unternehmen des Maschinenbaus auf dem Weltmarkt. Nach Angaben einheimischer und ausländischer Forscher ist der Bearbeitungsfehler in der Endphase der Teilefertigung, der nur auf thermische Prozesse in spanenden Maschinen zurückzuführen ist, bis zu 70% der Gesamtzahl betragen. Vergleichsstudien zu häufig verwendeten kleinen Maschinen sind jedoch in Informationsquellen nicht verfügbar.

Gegenstand der Studie ist die Mikrofräse Proxxon MF70 (Deutschland).

Forschungsgegenstand - der thermische Prozess im Element des technologischen Systems - der Spindelknoten als letztes Glied der fehlerbehafteten Umformkette.

Es wird vorgeschlagen, experimentelle Ergebnisse, die durch die Regelmäßigkeiten des thermischen Verhaltens einer kleinen Werkzeugmaschine erhalten und bestätigt wurden, zu verwenden, um die Methode der thermischen Stabilisierung zu begründen.

Schlüsselwörter: *Spindelknoten, thermische Verformungen, kleine Werkzeugmaschine, vordere und hintere Wälzlager, Temperatur, thermisches Feld.*

Зміст

Вступ.....	10
1. ВПЛИВ ТЕМПЕРАТУРНИХ ДЕФОРМАЦІЙ НА ТОЧНІСТЬ МЕХАНІЧНОЇ ОБРОБКИ.....	17
1.1 Характеристики джерел теплоутворень в металорізальних верстатах	17
1.2 Розрахунок теплових потоків та тепловиділення у підшипниках кочення	21
1.3 Вплив температурних деформацій на точність обробки на верстаті.....	26
1.4 Методи зниження температурних деформацій верстатів	29
1.5 Висновки по розділу	36
2. ІНФОРМАЦІЙНО-АНАЛІТИЧНИЙ АНАЛІЗ МЕТОДІВ МАТЕМАТИЧНИХ І ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ ТЕМПЕРАТУРИ ТА ТЕПЛОВИХ ЗМІЩЕНЬ ШПИНДЕЛЬНИХ ВУЗЛІВ ВЕРСТАТІВ.....	39
2.1 Випробування верстата в умовах неперервного режиму роботи.....	39
2.2 Випробування верстата під навантаженням.....	43
2.3 Експериментальні дослідження температурних деформацій токарно- револьверних верстатів.....	46
2.4 Висновки по розділу	54
3. ВИЗНАЧЕННЯ ТЕПЛОВОГО СТАНУ ФРЕЗЕРНОГО ВЕРСТАТУ PROXXON MF70	56
3.1 Технічні характеристики та опис базового верстата.....	56
3.2 Вибір електронного обладнання та реалізація програмного забезпечення	59
3.3 Визначення температури шпиндельного вузла.....	65
3.4 Вимірювання відхилення шпиндельного вузла	71
3.5 Висновки по розділу	76

4. МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ДЕФОРМАЦІЙ ШПИНДЕЛЬНОГО ВУЗЛА	78
4.1 Обґрунтування вибору методу розрахунку	78
4.2 Розрахунок шпіндельного вузла в Autodesk Inventor Nastran.....	80
4.3 Висновки по розділу	87
Додаток А	95
Додаток Б.....	98

Вступ

Верстати та верстатні системи незалежно від умов використання у споживачів, які значною мірою різняться, повинні задовольняти традиційні вимоги щодо продуктивності, точності, гнучкості і надійності. Але як змінився характер процесів різання через нові обробні й інструментальні матеріали, суттєво відрізняються компоновки й конструкції вузлів сучасних верстатів від традиційних, так і змістові складові і тим паче величини показників працездатності та способи їх забезпечення є іншими.

Актуальність теми. Тепловими явищами у верстатах напевне займалися завжди, але саме останніми десятиріччями цьому питанню приділяється особлива увага. Відповідні розробки й проекти впроваджені провідними верстатобудівними фірмами (DMG MORI, Okuma, Mitsubishi, Mazak, Hermle, Grob Werke). У Радянському союзі, в сучасних Україні, Росії та інших країнах пострадянського простору проводились аналітичні й експериментальні дослідження, є низка цікавих наукових розробок. Але про впровадження (та ще й широче) мова не йде, хоча б з огляду на стан верстатобудування й відповідних заводів. Ніхто не вважає, що верстатобудівні заводи не потребують змін та реорганізації, вони не могли існувати в попередньому стані, але чи треба було їх знищувати?

Зараз з'явилась певна кількість невеликих підприємств, зокрема й машинобудівного й навіть верстатобудівного профілю. Окремо можна відзначити підприємства, які професіонально здійснюють ремонт та модернізацію (в цьому разі навіть з елементами проектування).

Один з шляхів – не заміняти обладнання, а покращувати функції існуючого. Науковий підхід до створення систем, скерованих на підвищення окремих показників працездатності, відсутній, хоча окремі і не такі вже й нечисленні розробки існують. Умовою реалізації є технічне й математичне забезпечення, яке

здатне конфігуруватися. Створення такого забезпечення вимагає неабиякого аналітично-математичного і апаратного забезпечення.

В наш час є велика кількість старого універсального технологічного обладнання, з яким вміють працювати люди з великим досвідом роботи. Тенденція модернізації верстатів шляхом встановлення системи числового програмного керування та керованих двигунів на приводи подачі та на приводи головного руху стрімко зростає, адже це дозволяє підвищити продуктивність роботи, зменшити кінематичні похибки (завдяки відсутності кінематичних ланцюгів передачі руху), та звести нанівець вплив людського фактору. Висока швидкість різання – навіть не шлях підвищення продуктивності, а можливість застосовувати сучасні інструменти, які просто не працездатні за низьких швидкостей, та оброблювати сучасні матеріали.

Як одну з тенденцій можна відзначити мініатюризацію виробів і розробку відповідного верстатного обладнання, яке повинно відповідати певним вимогам. Подібне обладнання використовують у медичній галузі, в приладобудуванні, ювелірній галузі та врешті решт виготовлення деталей за індивідуальними замовленнями. Це переважно настільні верстати високошвидкісні та прецизійні. Значною групою є верстати фрезерної групи (мікрофрезерування), які можуть бути як з ручним керуванням, так і з ЧПК. Для такого обладнання зростає значення точності верстата з огляду на необхідність забезпечити точні формоутворюючі рухи за невеликих розмірів. Суттєвий вплив на точність має теплостійкість верстата, температурні деформації. Реальними факторами сучасного виробництва є зростання кількості енергоємного обладнання та використання висококонцентрованих джерел енергії (зокрема, використання додаткових механізмів та пристроїв з метою автоматизації верстатів та виробничого процесу), тож тепловий портрет верстата значним чином змінився.

Нагрів верстата зумовлює теплові деформації деталей, зміну форми поверхонь, порушення точності взаємного розташування вузлів – чинники впливу на точність.

З точки зору забезпечення теплової сталості верстата можна виділити дві задачі: зменшення тепловиділення та зменшення наслідків виділення тепла, яке не вдалося усунути. Щоб приймати адекватне рішення щодо розв’язку поставлених задач або вибору шляхів та способів впливу на показники необхідно мати достовірну інформацію щодо теплового стану якщо не представника кожного типу обладнання, то хоча б певної групи.

Мета та задачі дослідження. Метою роботи є уточнення відомих, але недостатньо досліджених (як теоретично, так і експериментально) та неузагальнених закономірностей теплового процесу у технологічній системі конкретного малогабаритного верстату, який має конструктивні особливості порівняно з верстатами середніх типорозмірів і таким чином отримати інформацію для прогнозування теплової поведінки (характер утворення теплового поля та ймовірних теплових деформацій).

Задачею магістерської дисертації є розробка та проведення експериментів, для визначення часу теплової стабілізації верстата, визначення зміщень кінця шпиндельного вузла при різних частотах обертання та проведення віртуального експерименту для підтвердження адекватності розробленої моделі процесу порівнянням розрахункових значень та отриманих в натурному експерименті з метою використання вказаної моделі у подальших дослідженнях.

Для досягнення мети необхідно вирішити наступні задачі:

- вивчити процес теплоутворення і теплові переміщення у шпиндельному вузлі обраного верстата та методи їх компенсації;
- проаналізувати різні методики проведення експериментів для вивчення теплового стану верстату;
- визначитись, в яких точках верстата вимірювати температуру;

- вибрати необхідний для вимірювання температури датчик;
- обрати вже готове програмне забезпечення чи розробити і реалізувати своє;
- підібрати необхідні електронні компоненти для роботи датчиків;
- визначити площини, в яких будуть проводитись вимірювання зміщень кінця шпиндельного вузла;
- обрати індикатори для вимірів відхилення, спроектувати та виготовити необхідне кріплення для встановлення їх на столі верстату;
- провести віртуальний експеримент в середовищі Autodesk Inventor Nastran 2020, впевнитись в адекватності моделі теплового процесу.

У роботі не розглядаються деформації несучої системи верстату та контактні явища між заготовкою та інструментом. Модернізація мікрофрезерного верстату передбачає встановлення керованих двигунів приводів подачі і відповідної системи керування. В роботі виконуватимуться експериментальні дослідження верстату з ручним керуванням, що повинні підтвердити адекватність розрахункової моделі, яка в майбутньому може бути використана для прогнозування теплової поведінки малогабаритних фрезерних верстатів в разі їхньої модернізації, оскільки основним джерелом теплової енергії у верстаті є шпиндельний вузол і його вплив на показники точності ми зможемо оцінити. Тобто розроблена розрахункова модель може бути доповнена у разі модернізації і використана для віртуального дослідження теплового стану верстату.

Аналіз теплових явищ, що виникають у технологічному обладнанні, передбачає наступні етапи:

- визначення потужності джерел тепловиділення;
- розрахунок або експериментальне визначення температурних полів у вузлах та елементах верстату;
- розрахунок або експериментальне визначення температурних деформацій вузлів та їх впливу на точність взаємного розташування інструменту та заготовки при роботі верстату.

Об'єкт дослідження – мікрофрезерний верстат Proxxon MF70 (Німеччина).

Предмет дослідження - тепловий процес в елементі технологічної системи – шпиндельному вузлі як в кінцевій ланці формоутворюючого ланцюга, що є чинником похибок.

Методи дослідження. В роботі проводилися виміри температури передньої та задньої опор, двигуна та вертикальної стойки. Визначалися час температурної стабілізації при різних частотах обертання шпинделя та зміщення осі шпинделя в двох перпендикулярних напрямках. Всі отримані дані були використані для проведення віртуального експерименту в середовищі Autodesk Inventor Nastran 2020, в якому використовується метод скінченних елементів.

Наукова новизна.

1. Вперше експериментально досліджено тепловий стан мікрофрезерного верстата Proxxon MF70 (Німеччина), як характерного представника малогабаритних фрезерних верстатів.

2. Встановлені закономірності змінювання нагріву основних складових верстата та температурних зміщень оправки, закріпленої в патроні (фактично інструмента).

3. Встановлені залежності, які дозволяють оцінити вплив нагрівання складових верстата на величину переміщень інструмента, закріпленого в патроні.

4. Отримав подальший розвиток віртуальний експеримент для розрахунку температурних зміщень шпинделя мікрофрезерного верстата з врахуванням отриманих даних натурного експерименту.

Практичне значення отриманих результатів.

1. Розроблена 3-D модель дозволяє виконувати розрахунки для шпиндельних вузлів малогабаритних фрезерних верстатів та може використовуватися для здійснення віртуальних експериментальних досліджень як шпиндельних вузлів, так і прогнозування окремих показників точності верстатів в разі модернізації.

2. Розроблена модель теплового процесу може використовуватися в навчальному процесі для автоматизованого проектування шпиндельних вузлів у курсових та дипломних проектах, магістерських дисертаціях.

Особистий внесок здобувача.

Всі основні результати дисертації отримані автором самостійно.

Постановка задач і аналіз результатів виконані разом із науковим керівником.

Апробація результатів дисертації.

Основні результати роботи доповідалися та обговорювалися на конференціях:

- Загально-університетська науково-технічна конференція молодих вчених та студентів, присвячена Дню Науки (м. Київ, НТУУ КПІ ім. І. Сікорського, 2017).
- XI Международная научно-практическая конференция «Актуальные проблемы современных наук – 2016» Сроки проведения: 07.06-15.06.2016 Польша
- Міжнародна конференція „Промислова гідравліка і пневматика“ - м. Вінниця; Дата проведення: 20.09.2017
- Міжнародна конференція Машинобудування очима молодих: прогресивні ідеї-наука-виробництво (МOM – 2017): матеріали тез доповідей XVII міжнародної науково-практичної конференції (м. Чернігів, 01-03 листопада 2017 р.) / Чернігівський національний технологічний університет.

- Оpubліковані у фаховому виданні «Перспективні технології та прилади» // м. Луцьк червень 2018 р. – Луцьк: Луцький НТУ, 2018 – с. 23-29 та у матеріалах конференцій.

За результатами роботи й виконаними дослідження підготовано статтю до фахового періодичного видання.

Публікації.

Оpubліковано 6 друкованих праць (тези доповідей і матеріали конференцій), які можна вважати підготовкою до обґрунтування теми досліджень та постановкою задачі.

Структура і обсяг роботи.

Дисертаційна робота складається із вступу, чотирьох розділів, загальних висновків, переліку використаних джерел і посилань із 19 найменувань. Обсяг дисертації – 103 сторінок. В роботу включено 53 рисунки, 4 таблиці, список використаних джерел літератури з 19 найменувань на 2 сторінках, додатки 2.

1. ВПЛИВ ТЕМПЕРАТУРНИХ ДЕФОРМАЦІЙ НА ТОЧНІСТЬ МЕХАНІЧНОЇ ОБРОБКИ

Енергія, яка підводиться до верстата, в частці, що не втрачається на здійснення процесу різання, перетворюється в теплову та акумулюється в вузлах, деталях і механізмах верстата та частково розсіюється в навколишньому середовищі. Це призводить до змінення теплового стану всієї конструкції металорізального верстата відносно початкового, нагріву деталей, вузлів та їхніх температурних деформацій. Причому вплив теплової енергії на кожен окремий елемент верстата різний через велику кількість факторів, які визначають протікання теплових та термопружних процесів. Вплив теплової енергії на елементи верстата залежить від виду та характеру джерела, умов теплообміну з навколишнім середовищем, способу підведення теплоти, форми та розмірів елемента, його матеріалу, орієнтації елемента в просторі, виду зв'язку та взаємодії з контактуючими з ним елементами та ряду інших факторів. Ступінь впливу кожного фактору різна, а необхідність його використання залежить від поставленого завдання, необхідної точності рішення та методів вирішення.

1.1 Характеристики джерел теплоутворень в металорізальних верстатах

Джерела тепловиділення в залежності від швидкості їх переміщення поділяються на рухомі та нерухомі. Для визначення типу джерела при теплофізичному аналізі може слугувати безрозмірний критерій Пекле [1]:

$$Pe = vl/\omega, \quad .1.1$$

де v – швидкість руху джерела, м/с, l – характерний розмір джерела, м, ω – коефіцієнт температуропровідності матеріалу, в якому (чи по якому) переміщується джерело, м²/с.

Якщо $P_e = 0$, то джерело вважається нерухомим, при $0 < P_e < 10$ джерело відноситься до рухомих, а при $P_e > 10$ джерело вважається швидкорухомим, тобто теплота не поширюється спереду джерела по напрямку його руху, а тільки під ним та позаду нього. Наприклад, якщо джерелом теплоутворення є шпindelна бабка, яка переміщується по напрямних, то по критерію Пекле це джерело при розрахунках може бути віднесено до любого з вище перелічених видів, хоча в більшості випадків його можна вважати нерухомим. Це визначається постановкою задачі та можливістю її розв'язку в цьому випадку, а також залежить від необхідної точності рішення. Якщо розглядати джерелом теплоутворення пару гвинт-гайка, то за критерієм Пекле це джерело може бути віднесено до рухомого або швидкорухомого.

Тривалість функціонування джерела характеризують безрозмірним критерієм Фур'є [1]:

$$Fo = \omega \tau / l^2, \quad .1.2$$

За тривалістю дії джерела можна поділити на миттєві ($Fo \rightarrow 0$), ті, що діють протягом скінченного відрізка часу ($Fo > 0$) та ті, які діють настільки довго, що процес теплообміну можна вважати стабільним ($Fo \rightarrow \infty$).

Миттєвих джерел на практиці не існує, але в деяких процесах тепловиділення відбувається настільки короткочасно, що тривалістю цього імпульсу можна знехтувати. Миттєве джерело використовують також як деяку абстракцію, яка дозволяє конструювати математичні вирази для опису процесу розподілу тепла в тяжких випадках.

Джерела тепла, що викликають температурні деформації верстатів, можуть бути як зовнішніми, так і внутрішніми.

До зовнішніх джерел відносять: коливання температури фундаменту та оточуючого середовища, повітряні потоки, системі нагріву та охолодження, які

розташовані поблизу верстата, а також сонячні промені, що безпосередньо падають на верстат, та процес різання. Механічна енергія в зоні різання перетворюється в тепло, яке переходить в заготовку, інструмент, стружку, а також частково видаляється охолоджуючою рідиною.

До внутрішніх джерел відносять: електродвигуни, гідроприводи та кінематичні пари.

Внутрішні джерела з постійним тепловиділенням (електродвигуни та гідроагрегати) повинні бути віддалені від несучої системи (НС) верстата там, де це можливо. Необхідно уникати вмонтованих електродвигунів в приводі шпинделів (зокрема і фланцевого кріплення на корпусних стінках) та зменшувати тепловиділення конструктивними засобами і шляхом використання високоефективних процесів обробки. Оскільки неможливо повністю ліквідувати втрати енергії і, відповідно, тепловиділення, важливим і ефективним способом керування тепловиділенням та компенсації тепла, що виділяється, залишається охолодження. В таблиці 1.1 [2] наведено методи зменшення тепловиділення.

Іншими джерелами тепла є підшипники, елементи приводів (зубчасті та пасові передачі, муфти, гвинтові пари, напрямні). Тепловиділення в них носить перемінний характер і залежить від режимів різання та характеристик самих елементів. Тепловиділенням можна керувати за допомогою вибору системи змащування, регулювання температури та кількості оливи, що подається до підшипників. Керування виділенням тепла в підшипниках і його компенсація досить ефективні для мінімізації похибок внаслідок температурних деформацій, оскільки шпиндельні підшипники зумовлюють значну їх частку.

Для всіх джерел тепла та елементів приводів із незмінними характеристиками, які неможливо винести за межі НС верстата, необхідно розробити ефективні, прості та економічно вигідні системи тепловідводу. Для джерел з перемінним виділенням тепла можуть бути розроблені пристрої охолодження з відповідним керуванням. Ефективним є встановлення матеріалів з низьким коефіцієнтом теплопровідності на шляху теплового потоку від джерела до елементу НС.

Таблиця 1.1

Методи зменшення тепловиділень

Джерела тепла	Характер джерела. Фактори впливу	Способи зменшення тепловиділення			
		Виключення	Обмеження	Керування	Компенсація
Електро-двигуни	Внутрішнє, постійний. Навантаження, вихрові токи, гістерезис, тертя в підшипниках, вентиляційні втрати	Винесення за межі верстата	Високопродуктивна обробка	Охолодження повітрям або оливою	Охолодження повітрям або оливою
Гідро-агрегати	Внутрішнє, постійний. Тиск, в'язкість, теплоємність оливи	Винесення за межі верстата	Висока продуктивність, оптимальна в'язкість, великий об'єм оливи	Охолодження повітрям або оливою	Охолодження повітрям, холодильники та інші охолоджуючі пристрої
Підшипники	Внутрішнє, змінний. Режими різання, в'язкість мастила, зазори, навантаження	Аеро- та гідростатичні підшипники	Низька в'язкість оливи, оптимальні зазори-натяги	Охолодження повітрям або оливою (кероване)	Охолодження повітрям або оливою
Напрявні	Внутрішнє, змінний. Режими різання, в'язкість мастила, зазори, натяг	Аеро- та гідростатичні напрямні	Оптимальна в'язкість оливи, поверхні з низьким тертям, пластикові накладки	Охолодження повітрям або оливою (кероване)	Охолодження повітрям або оливою
Ходові гвинти та гайки	Внутрішнє, змінний. Режими різання, змащування	Аеро- та гідростатичні гвинтові передачі	Змащування, поверхнева обробка для зниження тертя	Повітряне охолодження (кероване)	Повітряне охолодження
Зубчасті передачі	Внутрішнє, змінний. Режими різання, змащування	Винесення за межі НС за можливістю	Висока точність виготовлення та якість поверхні для зниження тертя	Охолодження рідиною (кероване)	Охолодження рідиною
Муфти	Внутрішнє, змінний. Режими різання, тертя	Винесення за межі НС (за можливістю)		Охолодження рідиною (кероване)	Охолодження рідиною
Паси та шків	Внутрішнє, змінний. Режими різання, тертя	Винесення за межі НС за можливістю		Охолодження рідиною (кероване)	Охолодження рідиною

Тепловіддача може бути збільшена за допомогою збільшення площі поверхні шляхом створення ребер на зовнішній поверхні та за рахунок підвищення коефіцієнта тепловіддачі примусової зовнішньої або внутрішньої конвекції.

Велике значення має температурна симетрія НС, що характеризується нульовими або вирівняними для різних елементів температурними

переміщеннями. Найбільш важливі вузли верстата можуть бути так відносно зорієнтовані, що температурні переміщення будуть повністю ліквідовані або зменшені, оскільки вони можуть взаємно компенсуватися. В кінцевому рахунку, лінійні та кутові переміщення вузлів верстата переносяться на переміщення поверхонь базування інструмента і заготовки, до яких можуть бути роздільно пристосовані методи керування та компенсації [2].

Ефективним може бути таке керування, яке запобігає виникненню похибок, або, в разі виникнення похибок, їх вихід за встановлені межі для забезпечення необхідної точності обробки. перевищенню ними меж, встановлених для забезпечення необхідної точності обробки. Для отримання деталей з постійним допуском можна використовувати адаптивне керування з обмеженням за геометричною точністю.

Вплив основних джерел теплоутворення, що визначають величину і характер температурних деформацій вузлів та деталей верстата, можна проводити шляхом вимірювання у часі температур характерних точок окремих вузлів верстата.

1.2 Розрахунок теплових потоків та тепловиділення у підшипниках кочення

Джерелом теплоутворення у працюючому підшипнику є тертя між його деталями. Момент тертя залежить від:

- конструкції підшипника;
- системи змащування та в'язкості мастила;
- точності виготовлення складових та якості складання підшипника;
- якості монтажу підшипника у вузлі.

Тепло, яке виникає у підшипнику, розподіляється між його деталями та передається через них іншим елементам конструкції, зокрема – шпинделя та стінкам шпиндельної опори, частково видаляється мастилом та розсіюється у повітряному прошарку всередині шпиндельної бабки.

Теплоутворення в опорах найчастіше незначне, складає невелику частину потужності холостого ходу верстату. Але утворюваної теплоти, особливо в разі високої швидкості, достатньо для того, щоб викликати значні температурні деформації вузлів. Тобто важливо оцінити потужність джерел тепловиділення.

Теплові потоки та тепловиділення у підшипниках кочення можна розрахувати за допомогою методики теплофізичного аналізу [1].

Припущення:

1. Підшипник та підшипниковий вузол розглядаємо як систему тіл, що знаходяться у контакті.

2. Джерела та витоки тепла у підшипнику вважаємо розподіленими рівномірно по робочих поверхнях внутрішнього та зовнішнього кілець та робочій поверхні шариків (через високу швидкість обертання).

3. Підшипник вважаємо двовимірним джерелом тепла щільністю q , Вт/м².

4. Торцеві поверхні кілець підшипників вважаємо адіабатичними, тобто такими, що виключають можливість віддавати або отримувати тепло ззовні.

5. Теплофізичні характеристики, теплопровідність, температуропровідність та коефіцієнт тепловіддачі приймають однаковими для сімейства ізотермічних поверхонь (тобто сімейство поверхонь рівних температур) на компонентах системи (деталі підшипника, вал, корпус, зубчасте колесо).

Баланс теплоти у системі тіл, яку являє підшипник:

$$Q = Q_1 + Q_2 + Q_3 \text{ [Вт]}, \quad (1.2.1)$$

де Q_1, Q_2, Q_3 – потужності теплових потоків які відповідно надходять, у вал (шпиндель) через внутрішнє кільце, в корпус через зовнішнє кільце та у змащувальну рідину.

Середня щільність тепловиділення:

$$q = \frac{Q_{заг}}{\pi \cdot b \cdot (d_з + d_{вн})} \text{ [Вт/м}^2\text{]} \quad (1.2.2)$$

де b – ширина підшипника, м; $d_з$ – діаметр зовнішнього кільця підшипника, м; $d_{вн}$ – діаметр внутрішнього кільця підшипника, м; $Q_{заг}$ – загальна потужність джерел тепловиділення, Вт:

$$Q_{заг} = i \cdot Q_{підш} \text{ [Вт]} \quad (1.2.3)$$

де $Q_{підш}$ – потужність тепловиділення в одному підшипнику кочення, Вт; i – кількість підшипників.

$$Q_{підш} = 1,047 \cdot 10^{-4} \cdot M_T \cdot n \text{ [Вт]}, \quad (1.2.4)$$

де M_T – момент тертя, Н·мм; n – частота обертання, хв⁻¹

$$M_T = M_0 + M_1 \text{ [Н]} \cdot \text{мм}, \quad (1.2.5)$$

де M_0 – момент тертя, що залежить від типу підшипника, Н·мм; M_1 – момент тертя, що залежить від навантаження на підшипник, Н·мм.

Момент M_0 досягає найбільших значень при високій частоті обертів, коли при інших рівних умовах втрати на тертя в основному (90-95%) залежать від умов змащування та в'язкості мастила. M_0 розраховується в залежності від добутку νn :

$$\text{при } \nu n \geq 2000 \quad M_0 = 10^{-7} \cdot f_0 \cdot (\nu n)^{\frac{2}{3}} \cdot d_{cp}^3 \text{ [Н} \cdot \text{мм]}, \quad (1.2.6)$$

$$\text{при } \nu n \leq 2000 \quad M_0 = 160 \cdot 10^{-7} f_0 \cdot d_{cp}^3 \text{ [Н} \cdot \text{мм]}, \quad (1.2.7)$$

де ν – кінематична в'язкість змащувального матеріалу при робочій температурі підшипника, мм²/с; f_0 – коефіцієнт, який залежить від типу підшипника та умов змащування; d_{cp} – середній діаметр підшипника, мм.

$$d_{cp} = \frac{D + d}{2} \text{ [мм]}, \quad (1.2.8)$$

де D – діаметр зовнішнього кільця підшипника, мм; d – діаметр внутрішнього кільця підшипника, мм.

Момент M_1 особливо великий при малій частоті обертання важко навантажених підшипників, в інших випадках його можна не враховувати.

Температуру на поверхнях зовнішнього та внутрішнього кілець можна знайти, як:

$$\theta_3 = \left(\frac{2 \cdot (q - q_1) \cdot \sqrt{\omega \cdot \tau}}{\lambda \cdot \sqrt{\pi}} \right) \cdot L_3 \text{ [}^\circ\text{C]}, \quad (1.2.9)$$

де q_1 – щільність потоку теплообміну, який надходить у зовнішнє кільце підшипника, Вт/м²; λ – теплопровідність, Вт/м·°C; ω – температуропровідність, м²/с; τ – час, протягом, якого поширюється теплота, с; L_3 – коефіцієнт форми для зовнішнього кільця.

$$\theta_{вн} = \left(\frac{2 \cdot (q - q_2) \cdot \sqrt{\omega \cdot \tau}}{\lambda \cdot \sqrt{\pi}} \right) \cdot L_{вн} \text{ [}^\circ\text{C]}, \quad (1.2.10)$$

де q_2 – щільність потоку теплообміну, який надходить у внутрішнє кільце підшипника, Вт/м²; λ – теплопровідність, Вт/м·°C; ω – температуропровідність, м²/с; τ – час, протягом, якого поширюється теплота, с; $L_{вн}$ – коефіцієнт форми для внутрішнього кільця.

$$L = \frac{1}{\varepsilon} |\ln(1 - \varepsilon)|, \quad (1.2.11)$$

де ε - безрозмірне відношення:

$$\varepsilon = \frac{\Delta}{r}, \quad (1.2.12)$$

де Δ - товщина стінки, м; r - радіус зовнішньої поверхні, м.

Значення q_1, q_2 знайдемо, вирішивши систему рівнянь:

$$\begin{cases} q \cdot L_3 - (L_3 + M_1) \cdot q_1 - M_2 \cdot q_2 = 0 \\ q \cdot L_{\text{вн}} - M_1 \cdot q_1 - (L_{\text{вн}} + M_2) \cdot q_2 = 0 \end{cases}, \quad (1.2.13)$$

$$\text{де} \quad M_1 = \frac{d_3 \cdot L_{\text{ш}}}{d_{\text{ш}} \cdot z}, \quad (1.2.14)$$

де d_3 – діаметр зовнішнього кільця підшипника, м; $d_{\text{ш}}$ – діаметр шариків, м; $d_{\text{вн}}$ – діаметр внутрішнього кільця підшипника, м; $L_{\text{ш}}$ – коефіцієнт форми для шарика; z – кількість шариків, шт.

Температура у підшипникових вузлах металорізальних верстатів стабілізується в середньому через десятки хвилин, а в деяких випадках через кілька годин [6].

Кільця підшипників передають тепло шпинделю (Q_2) та корпусу (Q_1):

$$Q_1 = q_1 \cdot S_1 \text{ [Вт]}, \quad (1.2.15)$$

де q_1 – щільність потоку теплообміну, який надходить у зовнішнє кільце підшипника, Вт/м²; S_1 – площа робочої поверхні підшипника, м².

$$Q_2 = q_2 \cdot S_2 \text{ [Вт]}, \quad (1.2.16)$$

де q_2 – щільність потоку теплообміну, який надходить у внутрішнє кільце підшипника, Вт/м²; S_2 – площа робочої поверхні підшипника, м².

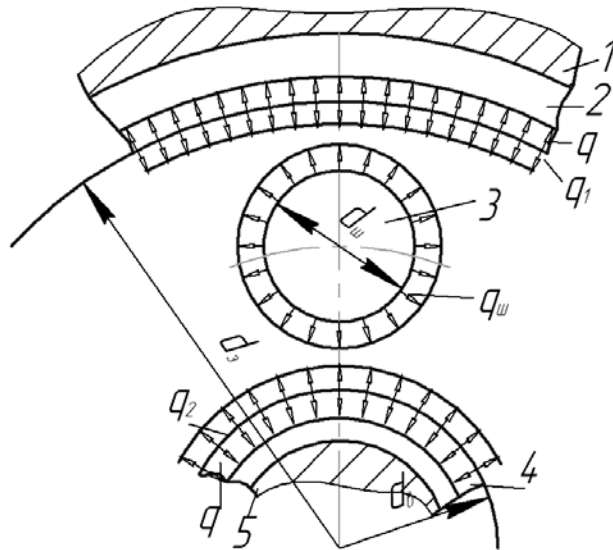


Рис. 1.1 – Структурна схема теплообміну в підшипнику кочення: 1 – корпус; 2 – зовнішнє кільце; 3 – шарик; 4 – внутрішнє кільце; 5 – вал.[1]

1.3 Вплив температурних деформацій на точність обробки на верстаті

Теплові деформації складають велику частку в загальному балансі похибок обробки на металообробних верстатах. Енергія, що підводиться до верстата, та не витрачається на корисну роботу, переходить в теплову енергію. Джерелами тепловиділення у верстатах можуть бути електродвигуни, зубчасті та пасові передачі, підшипники, муфти, система змащування, процес різання та ін. Теплота від цих джерел передається деталям верстата, перерозподіляється між ними, частково іде на нагрів самих джерел тепловиділення, а частково відводиться в навколишнє середовище. Тому ефективне керування тепловими явищами при механічній обробці можливе завдяки залученню основних законів теплообміну.

Теплообмін або теплопередача – це мимовільний процес поширення теплоти в просторі. Причому перенос теплоти з однієї області простору в іншу можливий тільки при різниці температур. Існують три основних способи переносу теплоти: теплопровідністю, конвекцією й тепловим випромінюванням.

Теплопровідність – молекулярне перенесення тепла у суцільному середовищі, зумовлене різницею температур (розповсюдження теплоти у деталях верстатів, у рухомих та нерухомих з'єднаннях через плями контакту або рідинні чи газові прошарки та ін.);

Конвекція – перенесення теплоти за рахунок макроскопічних елементів середовища при їх переміщенні, зумовленому неоднорідним розподілом температур (теплообмін деталей верстата з оточуючим середовищем, мастильною чи охолоджуючою рідиною та ін.);

Теплове випромінювання – перенос теплоти інфрачервоними променями хвилями, зумовлений температурою та властивостями середовища (теплообмін між деталями верстата та оточуючим середовищем) [3].

У реальних процесах теплообміну всі три основних види поширення теплоти найчастіше сполучаються.

Як показують дослідження, проведені на ряді верстатобудівних заводів, температура нагрівання на 20...30 % металорізальних верстатів перевищує припустимий рівень. Надмірне нагрівання небажане для верстатів, які використовують на операціях, що замикають технологічний процес, і зокрема, для верстатів із числовим програмним управлінням. Верстати з ЧПК, які в порівнянні з універсальними є більш енергоємними, а частка машинної часу в них досягає 70...90 %, особливо чутливі до температурних деформацій. У цих верстатах до 50 % енергії, що підводиться, внаслідок механічних і електричних втрат перетворюється в теплову. Як показують дослідження, внесок теплових деформацій у загальний баланс похибок обробки у верстатах з ЧПУ може доходити до 30...70 %. Крім того температурні деформації впливають на довговічність вузлів верстата. Внаслідок зміни лінійних розмірів сполучених деталей порушуються первісні зазорі й натяги. Збільшення натягів в опорах кочення призводить до зростання моменту холостого ходу, погіршенню умов змащення, прискореному зношуванню підшипників, а в деяких випадках до заїдання їх у роботі [4].

Температурні деформації верстата як результат деформацій його окремих деталей і вузлів приводять не тільки до лінійних відхилень різального інструменту щодо заготовки, але й до кутових поворотів його. Причому лінійні відхилення обумовлені середніми надлишковими температурами, а кутові виникають через перекручування первісної форми деталей верстата внаслідок нерівномірного просторового температурного поля цих деталей. Лінійні відхилення інструмента визначають похибку розміру оброблюваної поверхні, тоді як кутові відбиваються на точності форми й розташування оброблених поверхонь. Варто мати на увазі, що в той час, як перші похибки можна компенсувати, другі – неможливо [5].

Зміна взаємного положення інструмента й заготовки внаслідок температурних деформацій обумовлено в основному відхиленням шпинделя від його первісного вивіреного положення. Вплив різних факторів на величину й напрямок зміщення шпинделя в процесі роботи верстата встановлюється теоретичним або дослідним шляхом. В таблиці 1.2 схематично зображено види зміщення осі шпинделя при обробці призматичних та циліндричних деталей.

Таблиця 1.2

Види зміщень осі шпинделя

Тип зміщення	Зображення	Циліндрична деталь	Призматична деталь
Паралельне зміщення			
Кутове зміщення			
Осьове зміщення			

Слід зазначити, що навіть незначна надлишкова температура, під якою розуміють температуру, що перевищує нормальну, викликає досить істотні деформації. Наприклад, ходовий гвинт довжиною 1000 мм при нагріванні всього на один градус вище нормальної температури подовжується на 11,5 мкм, а при перепаді температури стінок колони $\Delta\theta = 4...5\text{ }^{\circ}\text{C}$ зміна кутового положення осі шпинделя

становить приблизно 0,1 мм на 1000 мм довжини. Внаслідок цього відхилення від паралельності торців оброблюваної деталі досягає 0,012 мм на довжині, що дорівнює 300 мм. Так, при обробці підшипникових кілець на торцешліфувальних верстатах зміна температури змащувально-охолоджувального технологічного середовища (МОТС) тільки на 1 °С призводить до збільшення відхилення від площинності торців на 0,12 мкм, а відхилення від паралельності – на 0,63 мкм [4, 6].

Ще одним важливим фактором теплових деформацій є температура навколишнього середовища, яка безупинно змінюється. Ці зміни залежать як від часу доби, так і від пори року. Причому коливання температури досить значні. Так, протягом доби температура в цеху з некондиційованим середовищем може змінюватися від 15 до 21 °С, а в літню пору протягом зміни – від 20 до 29 °С. Нестійка температура навколишнього середовища обумовлює нестабільний тепловий режим вузлів верстата, оброблюваної деталі й вимірювальних інструментів [4, 7].

1.4 Методи зниження температурних деформацій верстатів

Пильна увага, що приділяється останнім часом дослідженню температурних деформацій обумовлена, по-перше, впливом їх на продуктивність і точність обробки, по-друге – на довговічність металорізальних верстатів. Підвищене нагрівання верстатів призводить до втрати точності виробів, до зниження продуктивності обробки й терміну служби окремих вузлів верстата. Тому заходи по зниженню рівня температурних деформацій є виправданими й необхідними. Причому їх доцільно проводити вже на стадії проектування верстата. Природно, що це не виключає мір, спрямованих на зменшення температурних переміщень, які передбачаються при виготовленні й складанні верстатів, а також у період експлуатації. У зв'язку із цим способи зменшення деформацій можна розділити на конструктивні, технологічні, організаційно-технічні й компенсаційні.

Конструктивні:

1. вибір оптимальних розмірів та допусків основних деталей верстату

2. використання матеріалів з низьким коефіцієнтом теплопровідності (наприклад, з природного граніту, синтеграну виготовляють станини, плити, основи; з нітриду кремнію – столи, супорти; із склокераміки – шпинделі, і т.д.);
3. вибір оптимальної конструкції опор, їх розмірів та натягу;
4. вибір змащувальних матеріалів та систем змащування (наприклад, змащування масляним туманом ефективніше за змащування у масляній ванні)
5. примусове охолодження шпинделя та опор (наприклад, застосування повітряного, водяного охолодження або застосування циркуляційної системи змащування і т.д.);
6. штучне вирівнювання температурного поля, тобто збільшення температури на менше нагрітих ділянках деталі або зменшення її на значніше нагрітих – за допомогою бар'єрів, стиків, вентиляційних виїмків, теплових труб або інших регуляторів температури;
7. пристрої адаптації, які використовують для зменшення деформацій найбільш важливих деталей.
8. виносити джерела тепловиділення за межі верстату (електродвигуни, гідравлічні системи та інше);
9. локалізувати джерела тепловиділення (наприклад, теплоізоляція електродвигуна або відокремлення від верстата вузлів з передачами, таких як коробка швидкостей, за допомогою екранів).

Технологічні:

1. відслідковувати відхилення розмірів, форми та розташування поверхонь відповідальних деталей верстату на етапах виготовлення та складання;
2. враховувати величину та напрямок температурних деформацій при встановленні заготовок в пристосуванні;
3. дотримуватися послідовності при обробці поверхонь, які зв'язані з точними розмірами;

Організаційно-технічні:

1. розміщення верстатів в термоконстантних цехах;

Компенсаційні:

1. встановлюють датчики для вимірювання температури, які мають високу чутливість та реагують навіть на незначні змінення теплового стану, вони передають дані на ПК та за допомогою ЧПК компенсують деформації за рахунок відносного переміщення заготовки та ріжучого інструменту в напрямку осей координат.

Розглянемо роботу [8,9], в якій викладено метод компенсації температурної похибки, реалізованої на п'ятиосьових верстатах порталної компоновки MVR-серії фірми Mitsubishi Heavy Industry (МНІ, Японія). Фірма МНІ пропонує концепцію ATDS (Advanced Thermal Displacement Suppression System – Прогресивна система зменшення теплових деформацій).

Система ATDS передбачає:

- нечутливість конструкцій несучої системи верстату до змінень температури навколишнього середовища;
- систему охолодження верстата, яка враховує наявність внутрішніх джерел тепла;
- технологію прогнозування температурних зміщень та їх компенсацію.

Схема встановлення елементів практичної реалізації концепції ATDS на верстатах MVR-серії представлена на рисунку 1.2. На верстаті встановлюють три датчики температури на шпиндельній бабці та по два датчики на кожній колоні порталу. На порталі встановлені датчики кутового положення.

Система працює наступним чином. Данні про температуру з датчиків температури, а також данні кутового положення елементів несучої системи поступають до системи числового програмного керування. На базі заздалегідь побудованої регресійної моделі за отриманими даними про температуру обраховують фактичні температурні зміщення робочих органів верстата. Сформовані дані про температурні зміщення та кутові положення елементів несучої системи

дозволяють сформувати керуючі дії для приводів верстата по кожній координатній осі.

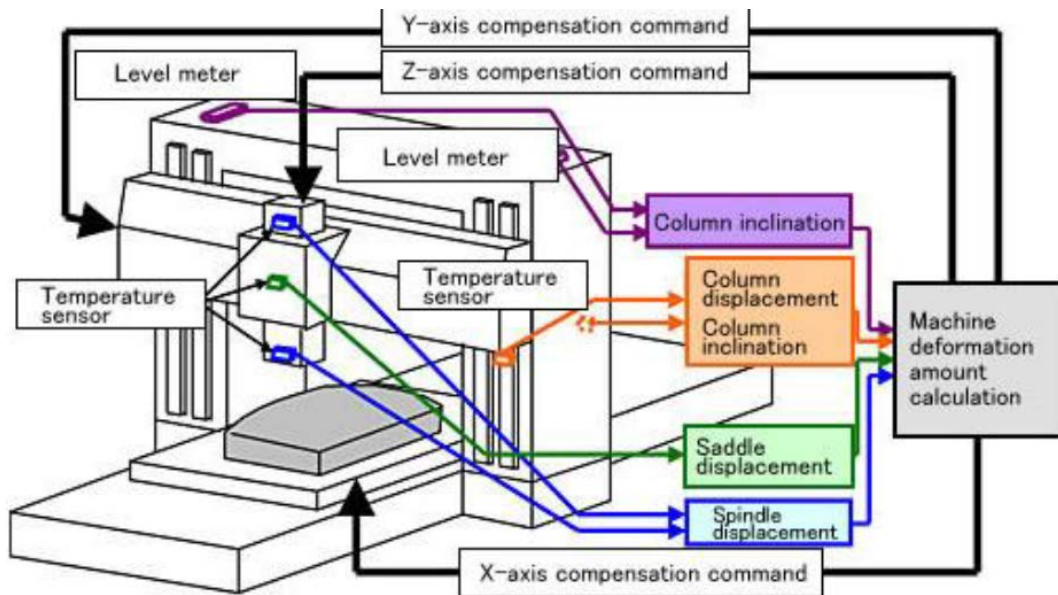


Рис. 1.2. Реалізація концепції ATDS на верстаті портальної компоновки [9,20]

Для отримання фактичних температурних зміщень використовувалась не тільки база даних за результатами реальних експериментів для цієї серії верстатів, але й результати комп'ютерного моделювання в CAE – системі. На рисунку 1.3 представлені сіткова модель несучої системи верстата та фрагмент результатів теплового розрахунку для шпиндельної головки (представлена у розрізі).

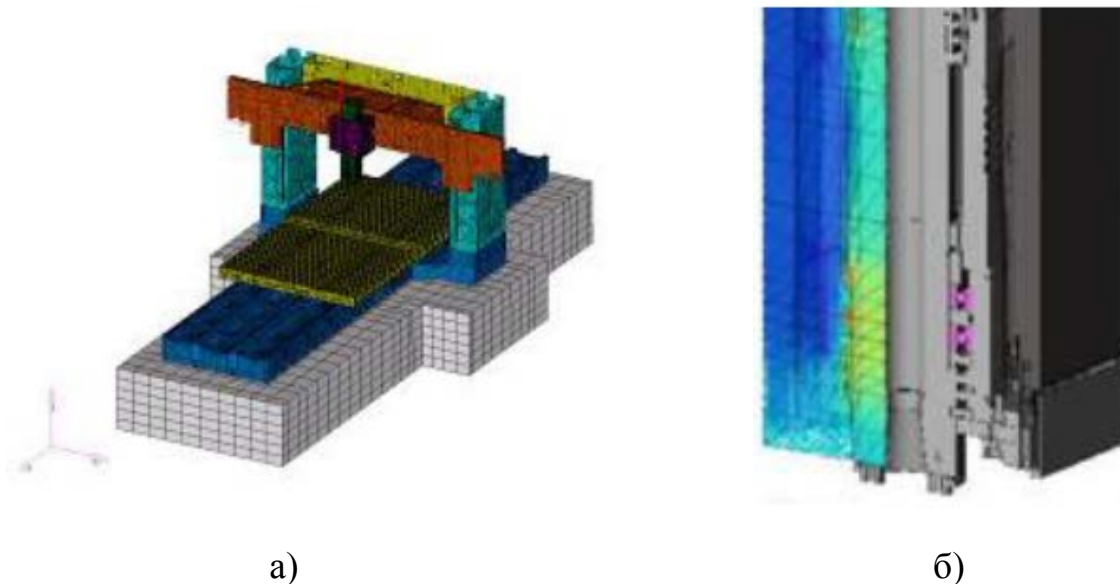


Рис. 1.3 Сіткова модель несучої системи верстата (а) та фрагмент результатів теплового розрахунку (б) [9,20]

Результат реалізації концепції ATDS представлена на рисунку 1.4.

Розмах зміщень робочого органу по осі Z від коливань температур в цеху в межах 8,4 °C склав 45 мкм. При реалізації системи ATDS – 16 мкм.

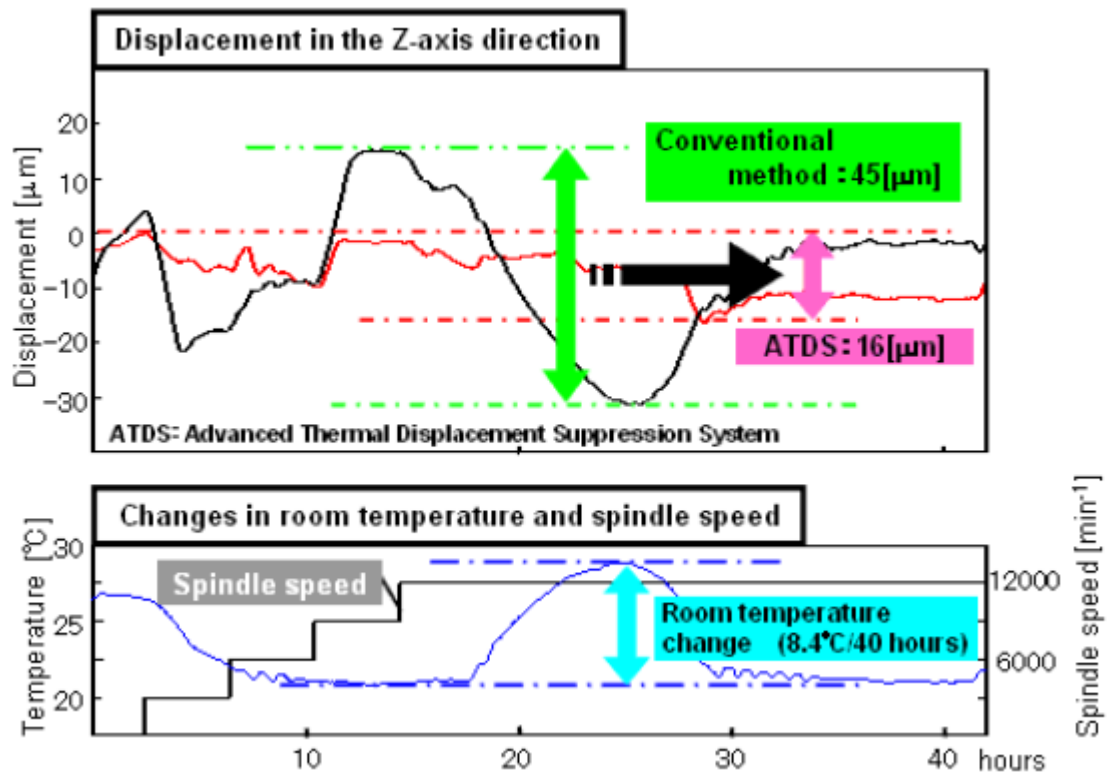


Рис.1.4 Результати реалізації концепції ATDS [9,20]

На рисунку 1.5 представлена реалізована на верстаті система охолодження шпиндельного вузла. Система містить два контури: внутрішній та зовнішній. Зовнішній контур призначений для зниження температури шпиндельного вузла в зоні першої опори. Внутрішній контур надає додатковий вплив на вирівнювання теплового стану шпиндельного вузла.

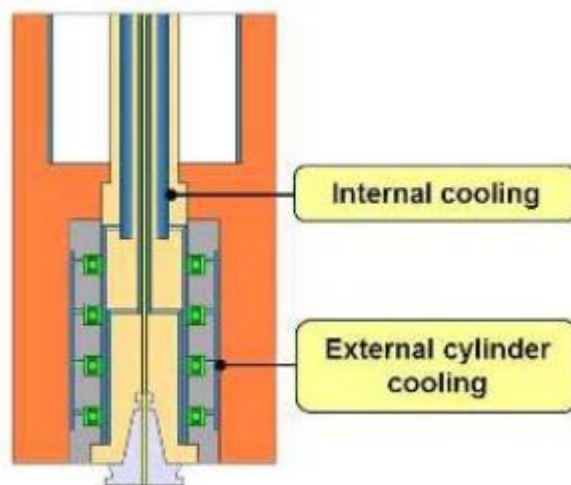


Рис.1.5 Система охолодження шпиндельного вузла[9,20]

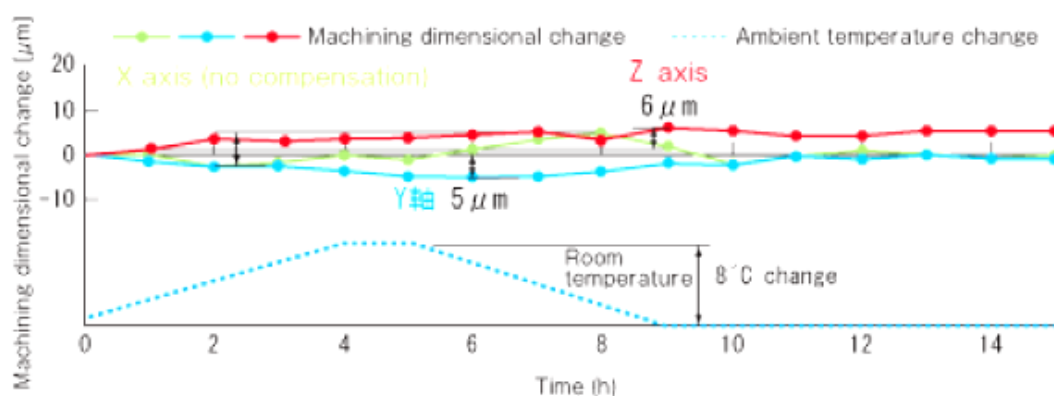
Фірма Okuma (Японія) відома розробкою «Thermo-Friendly-Concept» (TFC) – концепції конструювання прецизійних верстатів [10,11]. Данна концепція об'єднує технології керування та рішення, прийняті в компоновці верстата. Обидві частини TFC-концепції направлені на мінімізацію як кількості теплоти, що виділяється, так і тієї кількості теплоти, яку не можна відвести. Головною перевагою TFC-концепції висока розмірна стабільність оброблених деталей в проміжку довготривалої роботи, обумовлена гранично точною компенсацією теплових деформацій елементів несучої системи верстата.

Згідно TFC-концепції компоновка верстата повинна містити прості форми та конструктивні рішення, які сприяють вирівнюванню впливу температури навколишнього середовища по всім елементам несучої системи верстату, а виникаючі деформації достатньо точно прогнозуються та контролюються.

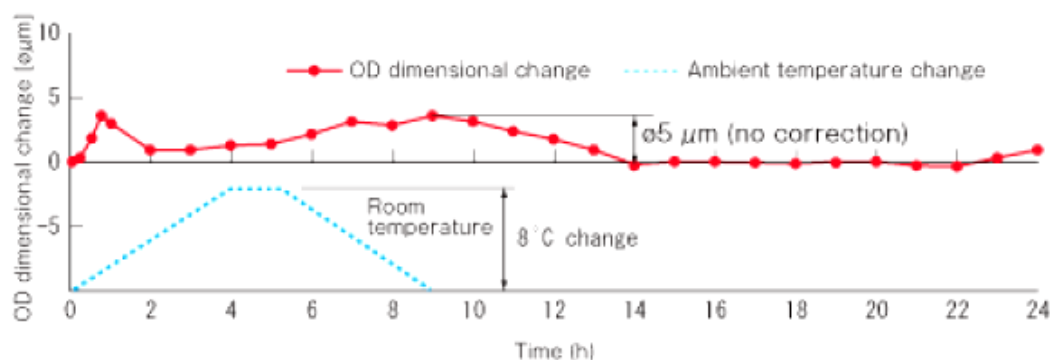
Технології керування використовують «тепловий активний стабілізатор фірми «Okuma» (TAS). Цей стабілізатор включає два компонента: TAS-S та TAS-C.

Перший компонент TAS-S – активний стабілізатор шпинделя враховує не тільки температуру шпинделя, а також інформацію про обертання шпинделя, в частині циклограми його роботи. Результатом цього є точний контроль деформації шпинделя. Активний стабілізатор конструкції верстата TAS-C базується на

теплових характеристиках верстата. Спеціальним чином розташовані датчики та дані про положення координатних осей дозволяють передбачити та точно здійснити керування температурними деформаціями в несучій системі верстата при зміні температури навколишнього середовища. На рисунку 1.6 представлені результати вимірів, проведених спеціалістами фірми Okuma для двох верстатів: вертикального обробляючого центра MD-46VA та токарного обробляючого центра LB3000 EXII. Оцінка ефективності реалізованої в верстатах TFC-концепції оцінювалась за розмірною точністю партії оброблених деталей.



а)



б)

Рис.1.6 Діаграми вимірів розмірів оброблених деталей при тривалій роботі верстата[10, 11,20]

Для центра MB-46VA (рис.1.6 а) обробка деталей здійснювалась протягом 15 годин, для токарного верстата LB3000 EXII (рис.1.6 б) - протягом 24 годин.

На рисунку 1.7 представлені температурні зміщення шпинделя обробляючого центра MD-46VA, які отримані при обертанні шпинделя з частотою

15 000 об/хв. Верстат працював в умовах повторно-короткочасного режиму: протягом перших 3-х годин встановлювалась постійна частота обертання шпинделя; протягом наступних 3-х годин шпиндель вимикався та фіксувалось зміщення переднього кінця шпинделя при охолодженні верстата; потім протягом наступних 90 хвилин верстат працював по складній циклограмі. Підсумком аналізу представлених фірмою Okuma результатів є: наявність пікових значень в моменти зміни режимів роботи шпинделя; відключення системи TAS-S навіть в прецензійних верстатах приводять до істотного відхилення осі шпинделя – більше 30 мкм.

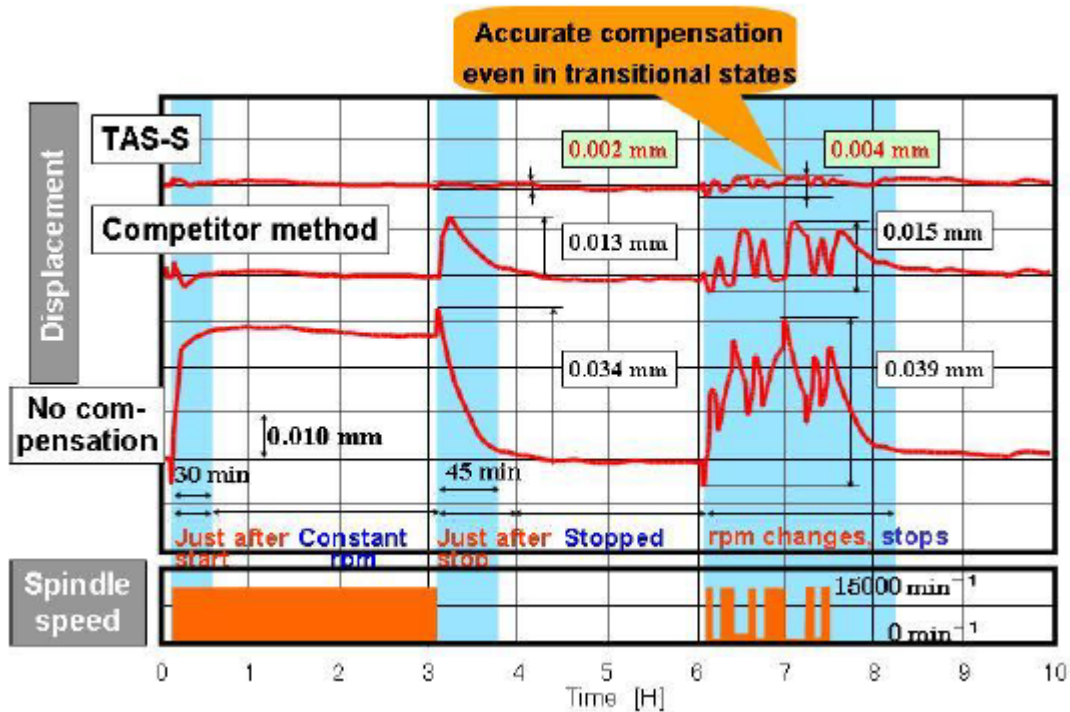


Рис. 1.7 Температурні зміщення переднього кінця шпинделя верстата MD-46VA [10, 11,20]

1.5 Висновки по розділу

Проведені дослідження показали, що зниження теплоутворення або його компенсація є суттєвим джерелом підвищення точності та надійності базового токарного верстату. Під час роботи верстату відбувається нерівномірне нагрівання

деталей та вузлів. Нестабільний тепловий режим металорізального верстату негативно впливає на точність оброблюваних деталей та працездатність вузлів. Через температурні деформації порушуються початкові зазори та натяги, що зумовлює, наприклад, зростання моменту холостого ходу у підшипниках кочення та їх швидке зношення, погіршення умов змащення тощо. Теплоутворення в опорах шпинделів пропорційне частоті обертання у ступені приблизно 1,7. У швидкохідних верстатах, з умови використання можливостей сучасного різального інструменту, що мають частоту обертання шпинделя 10 000-15 000 об/хв та більше, необхідно виконувати обов'язковий всебічний теплофізичний аналіз.

Задача зменшення або компенсації температурних похибок, які становлять у загальному балансі похибок 30-70% (залежно від типу верстату) є актуальною. Це підтверджується даними досліджень [12, 13, 14, 15] які показують, що у 20-30% металорізальних верстатів температура нагріву окремих вузлів перевищує припустимий рівень. Найбільш небажаним є це явище для верстатів чистової обробки та, зокрема, верстатів з ЧПУ.

Основними похибками, що впливають на точність обробки через теплові деформації є лінійні та кутові відхилення від первинного положення деталі та інструменту. Стосовно верстатів токарної групи це шпиндель, в якому закріплено деталь та інструментоносій – револьверний або лінійний супорт.

На підставі проведеного аналізу можна зробити такі висновки:

1. Роботи, які були проведені раніше, показали суттєвий вплив температурних деформацій на точність та теплостійкість шпиндельних вузлів верстатів. Теплові деформації викликають похибки розмірів та відхилення форми в процесі обробки деталей.
2. Через особливості теплопередачі неможливо досягнути повної відсутності зміщень, які викликані джерелами теплоутворень, як зовнішніми, так і внутрішніми.

3. Основним методом термостабілізації шпиндельних вузлів є використання систем охолодження, другим, за використанням, є різні конструктивні рішення та використання спеціальних матеріалів. Також знайшли застосування багато методів, за допомогою яких підвищують надійність та термостійкість окремих вузлів верстату, наприклад, теплові труби, як засіб стабілізації теплових деформацій шпиндельної бабки, в найбільш тепло навантаженому напрямку та інше.

4. Так як до цього часу жоден з методів термостабілізації не забезпечує термостійкість шпиндельного вузла, використовують декілька методів одночасно.

**2. ІНФОРМАЦІЙНО-АНАЛІТИЧНИЙ АНАЛІЗ
МЕТОДІВ МАТЕМАТИЧНИХ І ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ
ТЕМПЕРАТУРИ ТА ТЕПЛОВИХ ЗМІЩЕНЬ ШПИНДЕЛЬНИХ ВУЗЛІВ ВЕРСТАТІВ**

Пильна увага дослідників та конструкторів до питань тепловиділення та можливостей впливу як на нього, так і на його наслідки – теплові деформації простежується у досить значній кількості інформаційних джерел. Але при тому докладної інформації щодо методів математичних і експериментальних досліджень з цього приводу не так вже й багато. Ці дані необхідно ретельно проаналізувати й врахувати у подальших власних дослідженнях.

2.1 Випробування верстата в умовах неперервного режиму роботи

В роботі [8] автор приводить дані про серію випробувань верстата в умовах неперервного режиму роботи з вимірюванням та обробкою контрольних поверхонь – фрезерованих пазів на верхній грані зразку.

В умовах механічної обробки деталі на верстаті для вимірювання температурних переміщень робочого органу складно використовувати індикаторні головки. Практика обробки на верстатах з ЧПК показує, що при наявності прямокутного столу можливо використання кількох робочих зон. Тому пропонується при випробуваннях верстата під навантаженням одну зону використовувати для виконання реальної механічної обробки заготовки, а другу зону використовувати для формування контрольного зразка деталі, по якому можливо визначити температурні переміщення робочих органів верстата. В даному випадку в якості контрольного зразка деталі використовувалась деталь прямокутної форми, на верхній поверхні якої фрезерувалися пази. По зміні в часі глибини паза можна побудувати відповідну характеристику. Однак, виникає питання – чи існує розбіжність в значеннях вимірюваних температурних переміщень традиційним способом за допомогою індикаторних головок та при вимірюванні

пазів контрольного зразка. Схема теплових випробувань представлена на рисунку 2.1. Режим роботи верстата під час випробувань – неперервний. Проведено три серії експериментів з різними частотами обертання шпинделя: 3000 об/хв, 5000 об/хв та 7000 об/хв. Тривалість неперервної роботи верстата для 3000 об/хв склала 480 хвилин, 5000 об/хв – 360 хвилин та для 7000 об/хв – 270 хвилин. Покази температурних датчиків знімалися неперервно. В експерименті були визначені дві зони: зона вимірювань температурних переміщень робочого органу верстата (зона вимірів) та зона контролю температурних переміщень робочого органу верстата (зона контролю).

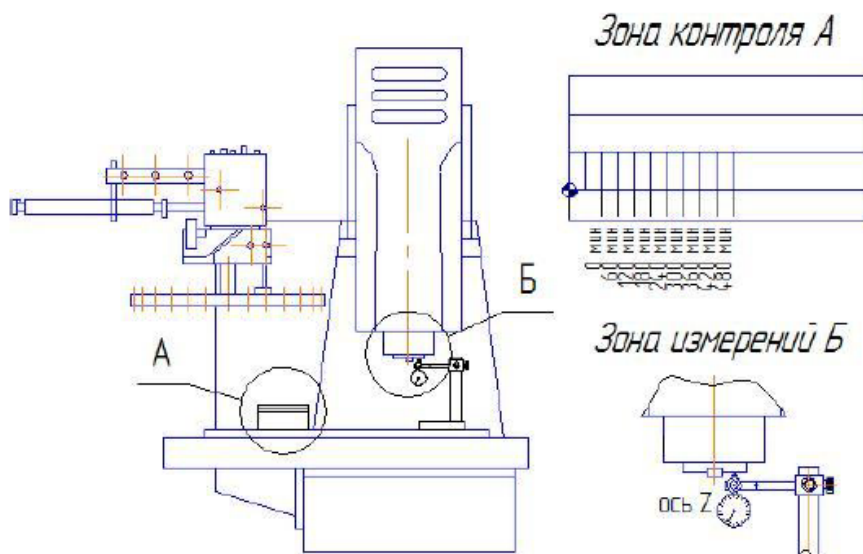


Рис.2.1 Схема теплових випробувань представлена [8,20]

В зоні вимірів встановлювалися три індикаторні головки, ніжки яких знаходилися в постійному контакті з корпусом шпиндельного вузла. В зоні контролю закріплювалась заготовка з алюмінієвого сплаву призматичної форми.

- Для чистоти експерименту – виключення додаткових похибок, експеримент проводився із заздалегідь встановленим ріжучим інструментом – кінцевою фрезою. Експеримент проводили по наступній схемі:
- в початковий момент часу робочі органи верстату переміщувалися в зону вимірів, де фіксувалися показання індикаторних головок;

- після цього фрезерна головка переміщалась в зону контролю, де виконувалося фрезерування двох пазів шириною 6 мм (з перекриттям) та глибиною 0,5 мм;
- після цього робочі органи верстата знову поверталися в зону вимірів та протягом 60 хв залишалися в цій зоні при працюючому на фіксованій частоті обертання шпинделі;
- після цього фрезерна головка знову відправлялась в зону контролю, де виконувалося фрезерування одного паза з перекриттям;
- всі перераховані етапи неодноразово повторювалися до закінчення запланованої тривалості експерименту.

Фрезерування пазів з перекриттям в зоні контролю виконувалися для того, щоб впевнитися в відсутності додаткових похибок, обумовлених якістю ріжучого інструмента.

Отримана ступінчата поверхня по окремій керуючій програмі вимірювалася індикаторною головкою, яка встановлена в оправці в шпинделі верстата (рис.2.2).

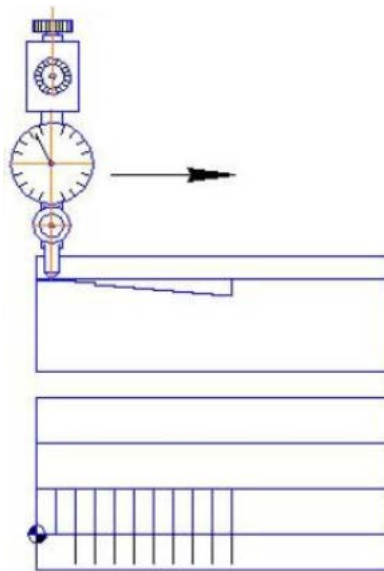
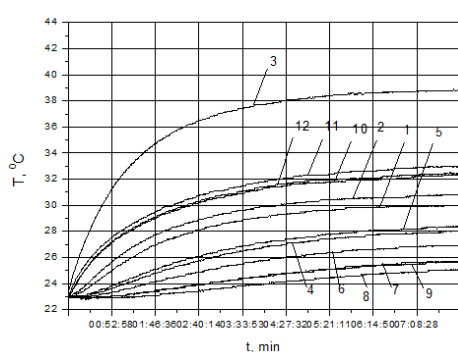


Рис.2.2 Схема вимірювання глибини пазів в зоні контролю [8,20]

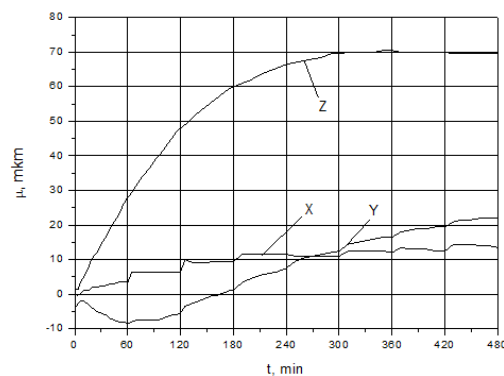
Різниця показів індикаторних головок в зоні вимірів та в зоні контролю склала не більш 1 мкм, що знаходиться в межах точності прибору. Аналіз

результатів показів індикаторних головок дозволив зробити висновок, що вимірювати величину температурних переміщень можна як при неперервному контакті вимірювальної ніжки індикаторної головки з корпусом шпиндельного вузла під час проведення випробувань, так і по контрольним пазам. Більш того, зафіксовані розбіжності в показах приборів в зоні вимірів та в зоні контролю показали, що нетривалі в часі та незначні по величині сили різання не приводять до додаткових похибок обробки. Це також дозволило зробити висновок, що при реальній металообробці з використанням ЗОР (змащувально-оходжувальної рідини) безпосередні вимірювання у зоні обробки можна виключити, натомість з мінімальною втратою точності вимірів оцінювати температурні переміщення тільки в зоні контролю.

На рисунках 2.3 – 2.5 представлені температурні характеристики та характеристики температурних переміщень по всіх осях для частот обертання шпинделя 3000 об/хв, 5000 об/хв та 7000 об/хв відповідно.

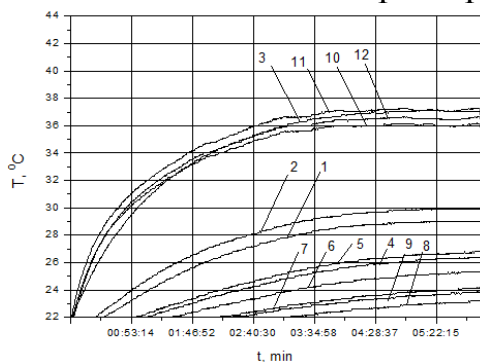


а)

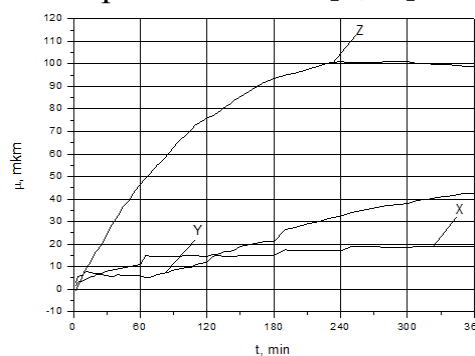


б)

Рис. 2.3 Теплові характеристики верстата при 3000 об/хв [8,20]

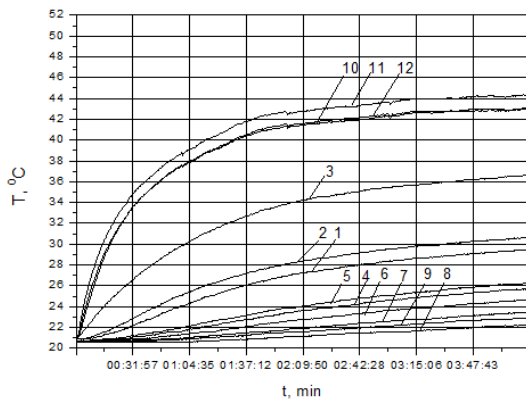


а)

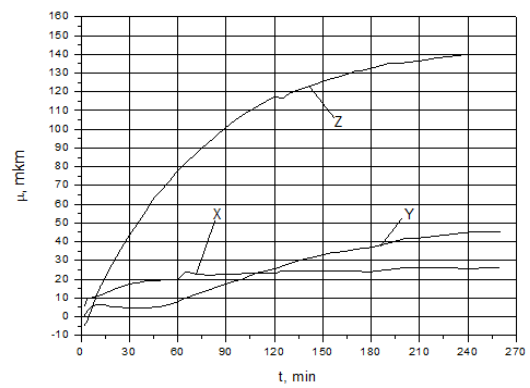


б)

Рис. 2.4 Теплові характеристики верстата при 5000 об/хв [8,20]



а)



б)

Рис. 2.5 Теплові характеристики верстата при 7000 об/хв [8,20]
Позначено: а)-залежності температури в часі; б)-Залежності теплових переміщень у часі.

2.2 Випробування верстата під навантаженням

Крім цього в цій роботі [8,20] було описано теплові випробування під навантаженням для оцінки впливу процесу різання на теплові переміщення шпиндельного вузла. Під час випробувань необхідно отримати відповіді на два основних питання:

- чи призводить навантаження від сил різання к додатковому теплоутворенню;
- чи існує закономірність вимірювання температурних зміщень робочих органів станка від глибини різання.

Схема випробувань представлена на рисунку 2.6. Результати минулого експерименту, показали, що використання контрольних пазів є хорошою альтернативою прямому вимірюванню за допомогою індикаторних головок. Область обробки верстат поділена на дві зони: 1 – зона контролю та вимірювання А; 2 – зона обробки Б. В зоні А встановлюється заготовка з алюмінієвого сплаву. В зоні Б встановлюється заготовка із сталі 40 ГОСТ 1050-88. В початковий момент випробування фрезерується два пази глибиною 0,5 мм та шириною 6 мм с перекриттям. Використовувалась фреза діаметром 10 мм. Умовно цей інструмент

названо контрольним. Потім відбувається зміна інструмента для виконання обробки в зоні Б – це виконується для виключення похибок зносу інструмента.

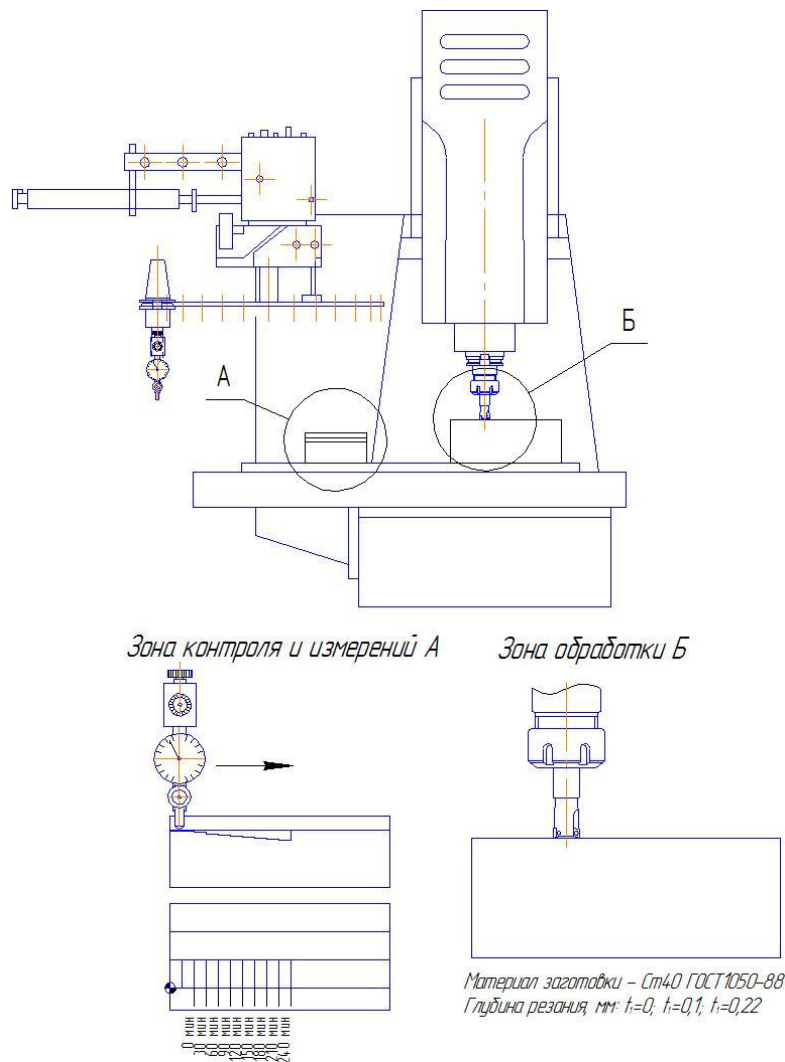


Рис.2.6 Схема випробувань верстат під навантаженням з обробкою металу [8]

Діаметр робочої фрези – 16 мм. Вид обробки в робочій зоні – фрезерування площини. Наявність фасок на ріжучій частині фрези зменшує ширину фрезерування. Частота обертання шпинделя 3000 об/хв. Фрезерування в зоні обробки виконується протягом 30 хвилин, потім виконується зміна робочого інструмента на контрольний та фрезерується паз з перекриттям в зоні А. Загальний час випробувань склало 240 хвилин, а загальна кількість циклів роботи – 8. Після завершення обробки в зонах А та Б сформовані температурні похибки визначаються за допомогою індикаторної головки по контрольним пазам в зоні А.

Випробування проводилися на різній глибині фрезерування робочою фрезою: 0,1 мм та 0,22 мм. Експеримент проводився в автоматичному режимі по керуючій програмі. Не змінюючи керуючу програму додатково, було проведено експеримент без заготовки у зоні Б, тобто здійснювалися випробування верстата без навантаження. Цей вид випробування дозволяє точніше показати вклад процесу різання у формування температурної похибки верстата. Порівнювати результати випробувань верстата під навантаженням (з імітацією обробки різанням) з результатами випробувань верстата без переміщень по осях не є коректним. В цьому випадку залишається не врахованою похибка верстата, що зумовлюється приводами.

Характер отриманих експериментальних даних показав, що процес різання сприяє зменшенню температурних похибок (Рис.2.7).

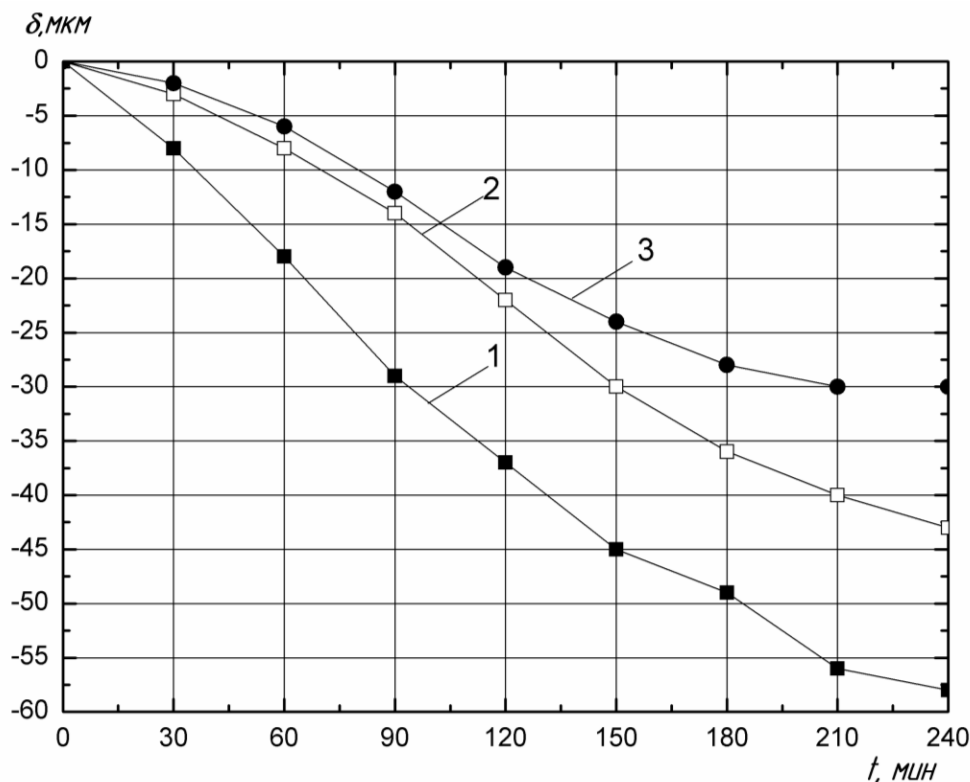


Рис.2.7 Результати випробувань верстата під навантаженням з обробкою заготовки [8]. Позначено: 1 – крива зміщення шпиндельної головки на холостому

ходу, 2 та 3 – криві переміщення шпиндельної головки при різанні з глибиною 0,1 мм та 0,22 мм відповідно.

З отриманих графіків видно, що при більшому навантаженні величина теплових переміщень менша, чим при меншому навантаженні шпинделя. Це легко пояснюється фактором піддатливості опор шпиндельного вузла та технологічної системи (СПД) в цілому.

2.3 Експериментальні дослідження температурних деформацій токарно-револьверних верстатів

Необхідність експериментальних досліджень температурних деформацій токарно-револьверних верстатів [2] визначена тем, що в деяких випадках під час приймальних випробувань верстатів та перевірки їх на відповідність нормам точності температурні деформації окремих вузлів викликають порушення геометричної точності верстата та призводять до зміни відносного положення оброблюваного виробу та інструмента, а саме систематично змінюють рівень розмірного настроювання верстата. Разом з тим, знання напрямку і часу стабілізації температурних деформацій дозволяє дати рекомендації щодо зменшення їх впливу на точність обробки деталей.

Температурні деформації токарно-револьверних верстатів складаються з деформацій шпиндельної бабки, шпинделя, станини по довжині та по висоті, супортної групи. Основними джерелами тепловиділення у верстатах моделей 1Г340П, 1В340Ф30, що мають традиційну компоновку, є шпиндельні опори та робоча рідина гідросистеми верстата. Представляють цікавість дослідження впливу температурних деформацій вузлів токарно-револьверного верстата моделі 1П420ПФ40, що має нахилену станину стрижневої конструкції.

Експериментальні дослідження проводились у наступній послідовності.

Для верстатів традиційної компоновки – на *першому* етапі досліджень визначається температура опор шпинделя, ряду характерних точок шпиндельної

бабки, станини, основи верстата та оливи в баку гідростанції, а також теплові деформації верстата у відповідності до схеми вимірювання, що наведена на рис. 2.4, в період від пуску верстата до часу стабілізації деформацій при роботі на холостому ході з числом обертів шпинделя $n = 1400$ об/хв.

Вимірювання проводились з інтервалом 5 хв. в перші 30 хв. роботи верстата і в подальшому з інтервалом 15 хв. до часу стабілізації теплових деформацій. Середній час простою верстата під час кожного вимірювання теплових деформацій індикаторами складає 1,5 хв.

На *другому* етапі досліджень, враховуючи те, що в задній опорі шпинделя верстата знаходиться гідравлічний механізм затиску деталей, вплив нагріву робочої рідини в якому на характер теплових деформацій верстата потребує окремого дослідження, визначаються ті ж самі параметри під час роботи приводу головного руху на холостому ході без обертання шпинделя (знято паси, що зв'язують вихідний вал коробки швидкостей зі шпинделем).

За допомогою термопар визначається надлишкова температура в характерних точках несучих вузлів верстата. Схему розміщення термопар та індикаторів при дослідженні верстата традиційної компоновки наведено на рисунку 2.8, де: точки 1÷4 розміщено на стінці шпиндельної бабки, що несе передню опору шпинделя; точки 8÷11 – на стінці шпиндельної бабки, що несе задню опору шпинделя; точку 7 – на корпусі шпиндельної бабки; точки 5, 6, 10, 12, 17 – на станині; точки 13, 14 – на основі; точки 15, 16 – на бобишках корпусу шпиндельної бабки, в яких встановлено шпиндельні підшипники. Індикатори И1 та И2 контролюють відносне переміщення осей шпинделя та інструментального отвору револьверної головки у вертикальній площині, а індикатори И3 та И4 – в горизонтальній площині. Загальний вигляд робочої зони верстата з вимірювальним оснащенням для контролю теплових деформацій показано на рисунку 2.9. Крім контролю температури у перерахованих точках, контролюється термометрами температура оточуючого повітря та оливи в баку гідростанції.

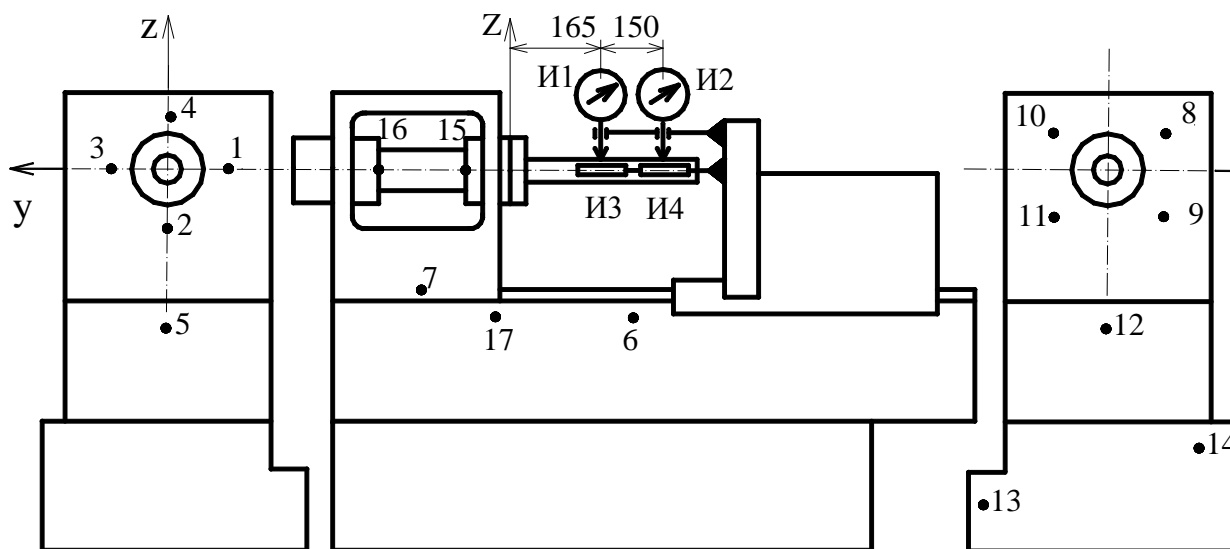


Рис. 2.8. Схема розміщення термопар та індикаторів при визначенні температур в точках та температурних деформацій токарно-револьверного верстата традиційної компоновки [2]

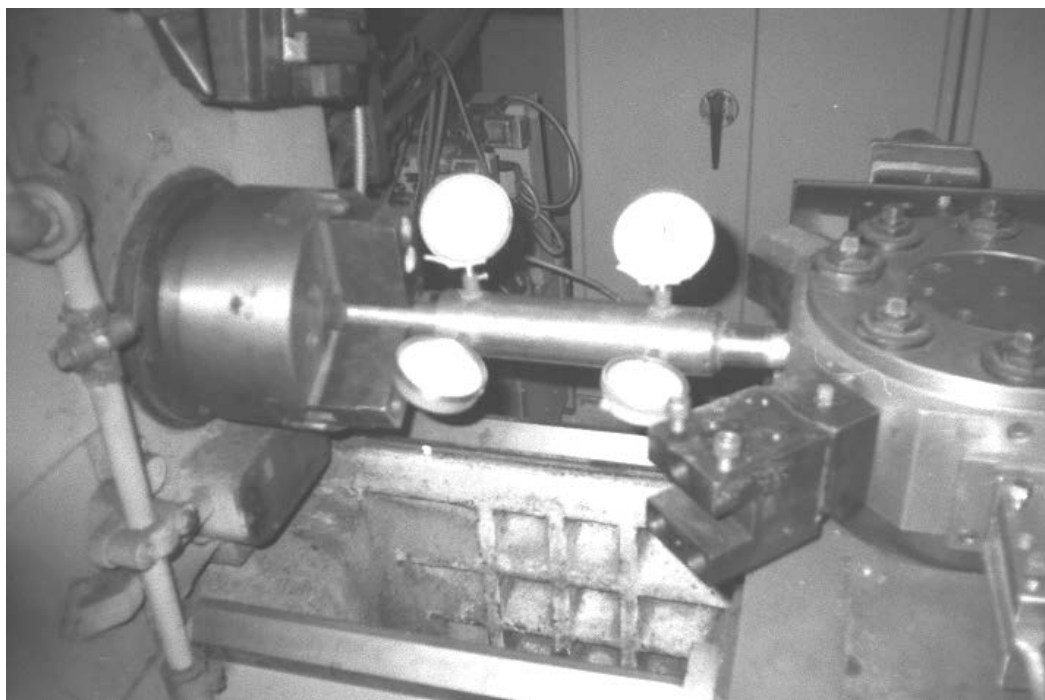


Рис. 2.9. Загальний вигляд робочої зони верстата із спеціальним оснащенням для реєстрації відносних переміщень осей шпинделя та інструментального отвору револьверної головки внаслідок температурних деформацій [2]

Дослідження верстатів з нахилоною станиною проводились в період від пуску верстата до часу стабілізації теплових деформацій на холостому ході у три етапи с частотами обертання шпинделя на першому, другому та третьому етапах відповідно – 3000 об/хв., 3500 об/хв. та 4000 об/хв. Інтервали вимірювання аналогічні попереднім.

Схему розміщення термопар та індикаторів при дослідженні верстата з нахилоною станиною наведено на рисунку 2.10, де: точки 1 та 2 розміщено на бобишках корпусу шпиндельної бабки, що несуть шпиндельні підшипники; точка 4 - на корпусі втулки маслопідводу гідравлічного приводу затиску заготовок точки; точки 3, 5÷10 – на корпусі шпиндельної бабки; точки 11÷15 на торці станини зі сторони шпиндельної бабки та точки 23÷25 на протилежному торці станини (на рис. 2.10 не вказані); точки 17÷20 – на корпусі револьверної головки; точки 21, 22 – на поперечних полозках супорта. Індикаторами за допомогою спеціальних оправок реєструються лінійні та кутові переміщення осі шпинделя по відношенню до осі інструментального отвору револьверної головки в площинах перпендикулярній (індикатори И1 та И2) і паралельній (індикатори И3 та И4) напрямним станини. Крім перерахованих точок, контролюється температура оточуючого повітря, оливи в баку гідростанції термометрами та температура потоку повітря з двох кінців циліндричної порожнини станини.

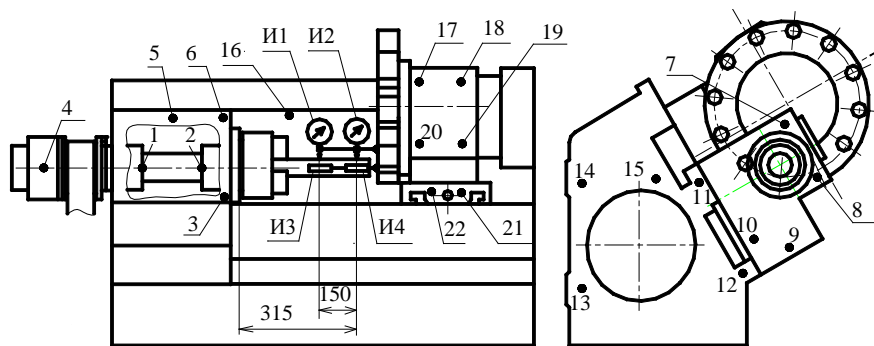


Рис. 2.10. Схема розміщення термопар при визначенні температур в точках та індикаторів для реєстрації температурних деформацій токарно-револьверного верстата з нахилоною станиною[2].

Для вимірювання температур і температурних деформацій використовують наступний комплект приладів: термопари хромель-алюмель діаметром 0,2 мм, багатопозиційний перемикач, цифровий вольтметр типу В7-23, термометри, індикатори з ціною поділки шкали 0,001 и 0,002 мм.

Результати досліджень верстата традиційної компоновки представлені на рисунку 2.11 та рисунку. 2.12. На рисунку 2.11 представлені графіки зміни надлишкових температур в контрольованих точках за час роботи верстата до набуття ним теплової рівноваги, а на рисунку 2.12 – графіки зміни показань індикаторів И1...И4 при першому та другому етапах досліджень верстата.

Результати першого етапу досліджень верстата традиційної компоновки показали, що: - переміщення осі шпинделя відносно осі інструментального отвору револьверної головки направлено догори у вертикальній та „на робочого” у горизонтальній площинах; - стабілізація температурних деформацій у вертикальній площині настає після 210 хв. роботи верстата; - в горизонтальній площині до 80 % температурних деформацій припадає на період від пуску до 45 хв. роботи верстата, а їх стабілізація настає через 75 хв.

Температурні зміщення осі шпинделя відносно осі інструментального отвору револьверної головки досягають у вертикальній площині 0,12 мм і у горизонтальній – 0,042 мм, перекис осі шпинделя при тепловій рівновазі склав 0,007 мм у вертикальній та 0,008 мм у горизонтальній площинах на довжині 150 мм.

Із рис. 2.11 видно, що інтенсивність теплоутворення в передній та задній опорах шпинделя різна. В задній опорі (точка 16) тепловиділення більш інтенсивне, ніж у передній (точка 16). Це пояснюється тим, що крім нагріву підшипника в задній опорі є ще одне джерело теплоутворення, а саме маслопідвод механізму затиску деталей, в який поступає олива із бака гідростанції.

Порівнюючи температуру в точках 8...11 з температурою в точках 1...4 можна відмітити, що внаслідок різних умов тепловідводу передня стінка

шпиндельної бабки нагрівається більше ніж задня. Це пояснює напрям перекосу осі шпинделя у вертикальній площині, при якому $I_{2,a} > I_{1,a}$ (рис. 2.8).

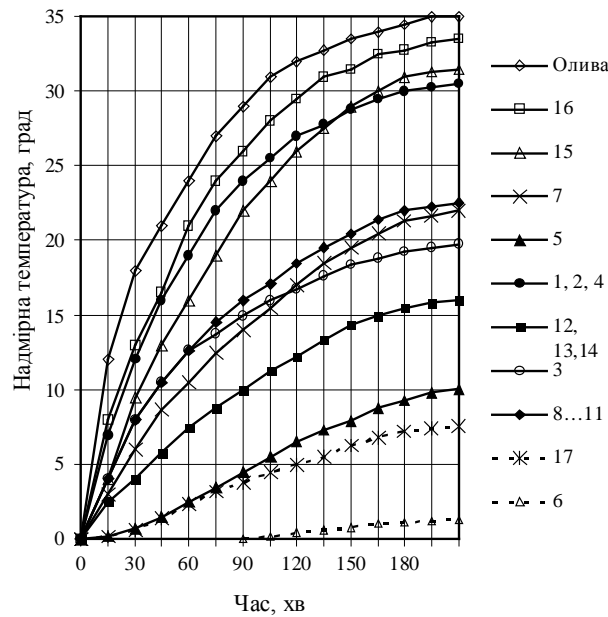


Рис. 2.11. Графіки залежності температури в точках 1...17 від часу роботи верстата 1Г340П без різання з частотою обертання шпинделя $n = 1400$ об/хв [2].

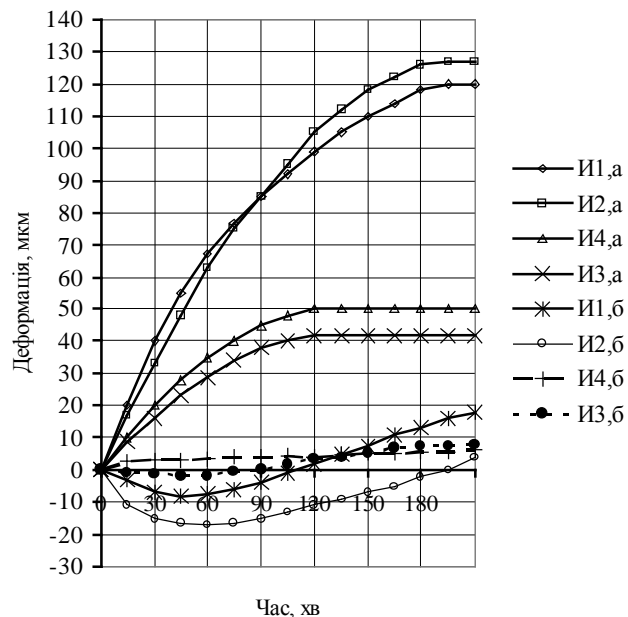


Рис. 2.12. Графіки залежності показань індикаторів від часу роботи верстата без різання з частотою обертання шпинделя $n = 1400$ об/хв. ($I_{1,a}$... $I_{4,a}$) та при відключеному обертанні шпинделя ($I_{1,б}$... $I_{4,б}$) [2].

Нагрів у точках 13 та 14 пов'язаний з тепловиділеннями в двигуні приводу головного руху та гідростанції змащування, які розміщені в основі верстата. Зміна температур в точках 6 та 17 впродовж 4 годин роботи верстата несуттєва, таким чином температурні деформації станини на ділянці розташування цих точок не здійснюють суттєвого впливу на сумарні температурні деформації осей шпинделя та револьверної головки.

Із рис. 2.8 видно, що при відключеному обертанні шпинделя в його задній опорі внаслідок наявності джерела тепловиділення, а саме маслопідводу механізму затиску деталей, іде інтенсивне теплоутворення, яке призводить до зміщення шпинделя уверх та перекосу його осі у вертикальній площині до 9 мкм на довжині 150 мм, при цьому напрям перекосу змінився $I2,6 < I1,6$.

Звідси можна зробити висновок, що основними джерелами теплоутворення у верстатах традиційної компоновки є опори шпинделя та нагрів оливи в гідросистемі. Ці джерела здійснюють найбільший вплив на величину та напрямок температурних деформацій верстата. Додатковими джерелами теплоутворення є елементи приводів головного руху та подач – коробка швидкостей, коробка подач, двигун, а також гідростанція змащування.

Результати досліджень верстата з нахиленою станиною мод. 1П420ПФ40 представлені на рисунку 2.13 та рисунку 2.14. На рисунку 2.13 представлені графіки зміни надлишкових температур в контрольованих точках за час роботи верстата до набуття ним теплової рівноваги, а на рисунку 2.14 – графіки зміни показань індикаторів $I1$ та $I2$ при різних частотах обертання шпиндельного вузла.

За результатами експериментальних досліджень температурних деформацій верстата 1П420ПФ40 можна зробити наступні висновки:

- основними джерелами теплоутворення у верстаті є нагрів оливи в гідросистемі та приводі затиску, а також нагрів шпиндельних опор;

- найбільші надмірні температури нагріву зареєстровані при частоті обертання шпинделя 4000 об/хв. в баку гідросистеми 32⁰С, на корпусі маслопідводу приводу затиску (точка 4) 30,5⁰С, в передній опорі шпинделя (точка 2) 23⁰С і в задній опорі шпинделя (точка 4) 18⁰С;

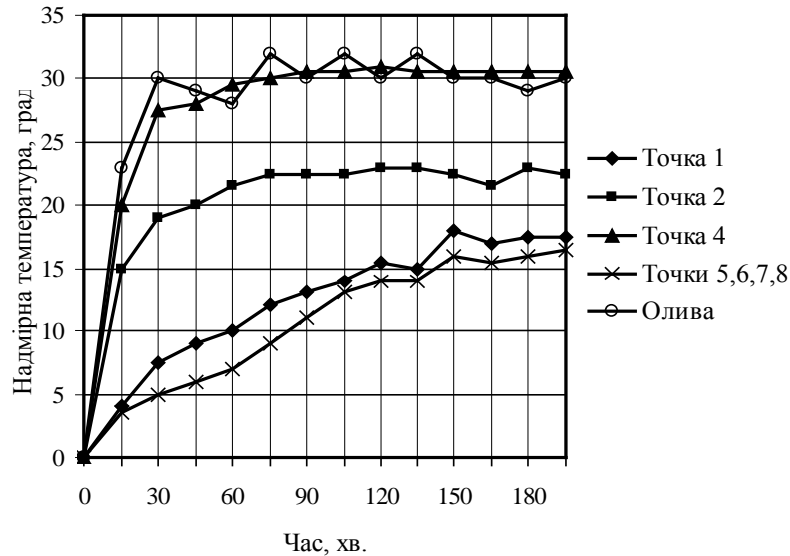


Рис. 2.13. Графіки залежності температури в контрольованих точках від часу роботи верстата мод. 1П420ПФ40 без різання з максимальною частотою обертання шпинделя $n=4000$ об/хв[2].

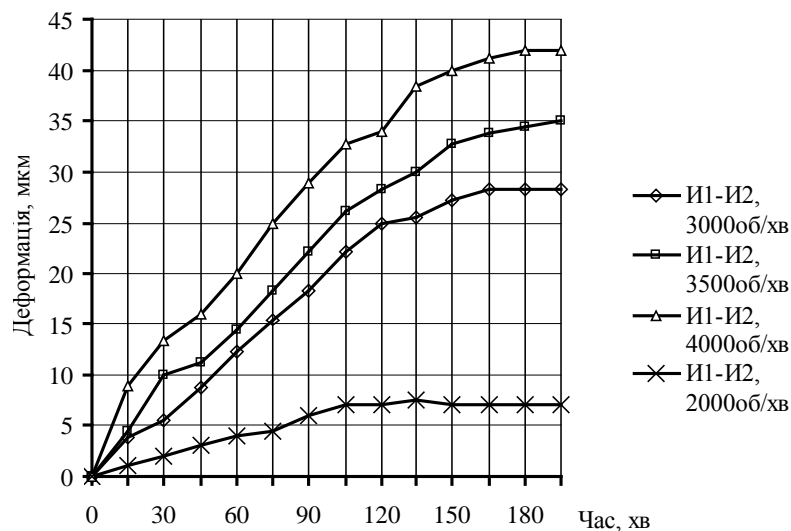


Рис. 2.14. Графіки залежності показань індикаторів ІІ1 та ІІ2 від часу роботи верстата без різання з частотами обертання шпинделя $n=2000, 3000, 3500$ та 4000 об/хв [2].

Таким чином, конструкція верстата мод. 1П420ПФ30 з нахиленою станиною трубчастої форми, сучасними конструкціями шпиндельного вузла, головного приводу та приводу затиску, по відношенню до верстатів традиційної компоновки, має термосиметричну конструкцію з ефективним тепловідводом від джерел теплоутворення та може бути використана як базова для створення верстатів високого класу точності.

2.4 Висновки по розділу

Проаналізувавши методи експериментальних досліджень температури та теплових зміщень шпиндельних вузлів верстатів можна зробити наступні висновки:

- огляд наявної докладної інформації щодо експериментальних досліджень підтвердив, що попри певні закономірності в формуванні теплового стану верстату, наявні суттєві розбіжності, які зумовлені в першу чергу компоновкою верстата, наявністю додаткових джерел теплоутворення (система гідрозатиску деталі, гідросистема та двигуни які знаходяться поблизу верстату);
- є припустимим здійснювати замість прямого вимірювання температурних переміщень за допомогою індикаторних головок безпосередньо у зоні обробки, використовувати вимірювання контрольних зразків, що є особливо доцільним при обробці в умовах застосування МОР;
- верстат з нахиленою станиною має термосиметричну конструкцію з ефективним тепловідводом від джерел теплоутворення та може бути використана як базова для створення верстатів високого класу точності;
- є залежність, що при більшому навантаженні величина теплових переміщень менша, чим при меншому навантаженні;
- в деяких верстатах сили різання не мають суттєвого впливу на тепловий стан верстату, а навпаки вони компенсують теплові зміщення;

- Час виходу у стабільний режим залежить від швидкості і є різним для різних верстатів за однієї й тої ж частоти

3. ВИЗНАЧЕННЯ ТЕПЛОВОГО СТАНУ ФРЕЗЕРНОГО ВЕРСТАТУ PROXXON MF70

Якість експериментальних досліджень обумовлюється достовірністю отриманої експериментальної інформації, що суттєво залежить від застосованої методики, зокрема тривалості досліджень і частоти вимірювань, режимів навантаження під час досліджень та технічних характеристик вимірювальної техніки і забезпечення стабільності вимірювань (наприклад, ізоляція від впливу зовнішнього середовища). Найважливішими технічними характеристиками є: теплова інерція датчика температури, дискретність вимірів, абсолютна точність вимірів. Повнота експериментальної інформації встановлюється: часом теплових випробувань, які зіставляються з часом температурної стабілізації верстата; дискретністю (в часі) проведення температурних вимірів та температурних зміщень; повнота охоплення температурного поля станка датчиками температури; методикою теплових випробувань.

Для дослідження термодеоформаційного стану був обраний мікрофрезерний верстат нормальної точності. Випробування проводилися за допомогою розробленого вимірювального комплексу.

1.1 Технічні характеристики та опис базового верстата

Об'єктом дослідження температурних деформації є мікрофрезерний верстат Proxxon MF70 (Німеччина) (рис.3.1). На цьому верстаті можна обробляти деталі зі сталі, чавуну та алюмінію. В таблиці 3.1 наведені технічні характеристики верстату.

Таблиця 3.1

Технічні характеристики

Напруга	230 В, 50/60 Гц
Потужність	0.1 кВт
Діапазон обертання шпинделя	5000 – 20 000 об/хв
Методи кріплення інструменту	Цанговий патрон
Переміщення по осі X	134 мм
Переміщення по осі Y	46 мм
Переміщення по осі Z	83 мм
Розмір столу	200 x 70 мм
Відстань між Т-подібним пазами	25 мм
Загальна висота	340 мм
Рівень шуму	70дБ
Рівень вібрації	2.5 м/с ²
Маса	8 кг

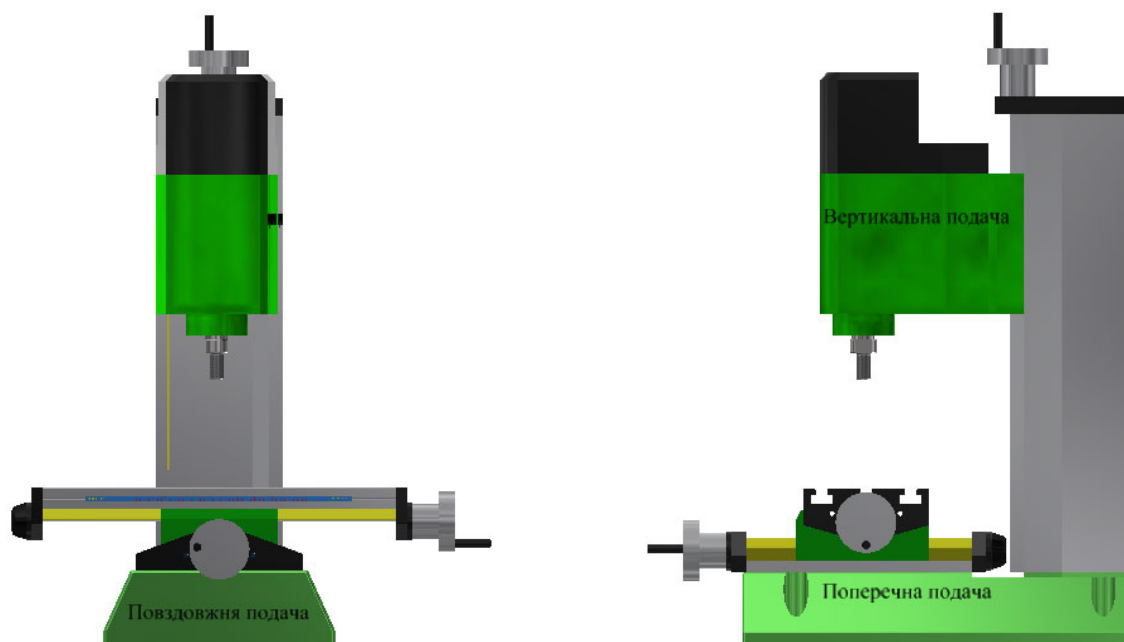


Рис.3.1 Загальний вид верстата

Для обробки поверхонь використовують пальцеву фрезу діаметром від 1 до 3.2 мм. Затиск інструмента відбувається за допомогою цангового патрона. Тип двигуна привода головного руху – колекторний двигун. Діапазон частот обертання шпинделя від 5000 об/хв до 20 000 об/хв. Потужність 100 Вт [16]. Деталь закріплюють на

хрестовому столі. Верстат має три привода подачі: повздовжньої, поперечної та вертикальної. Подачі здійснюються робітником. Принцип дії приводів подачі аналогічний по всіх осях. Наприклад, поперечна подача (Рис. 3.1 Кінематична схема базового верстата) здійснюється при передачі руху від маховика 1 на гвинт 2, а від гвинта на гайку 3, яка закріплена на хрестовому столі. Передача обертання на шпиндель здійснюється від двигуна 7 через пружну муфту 5 на шпиндель. В якості опор шпиндельного вузла використовуються радіально-упорні шарикопідшипники 6.

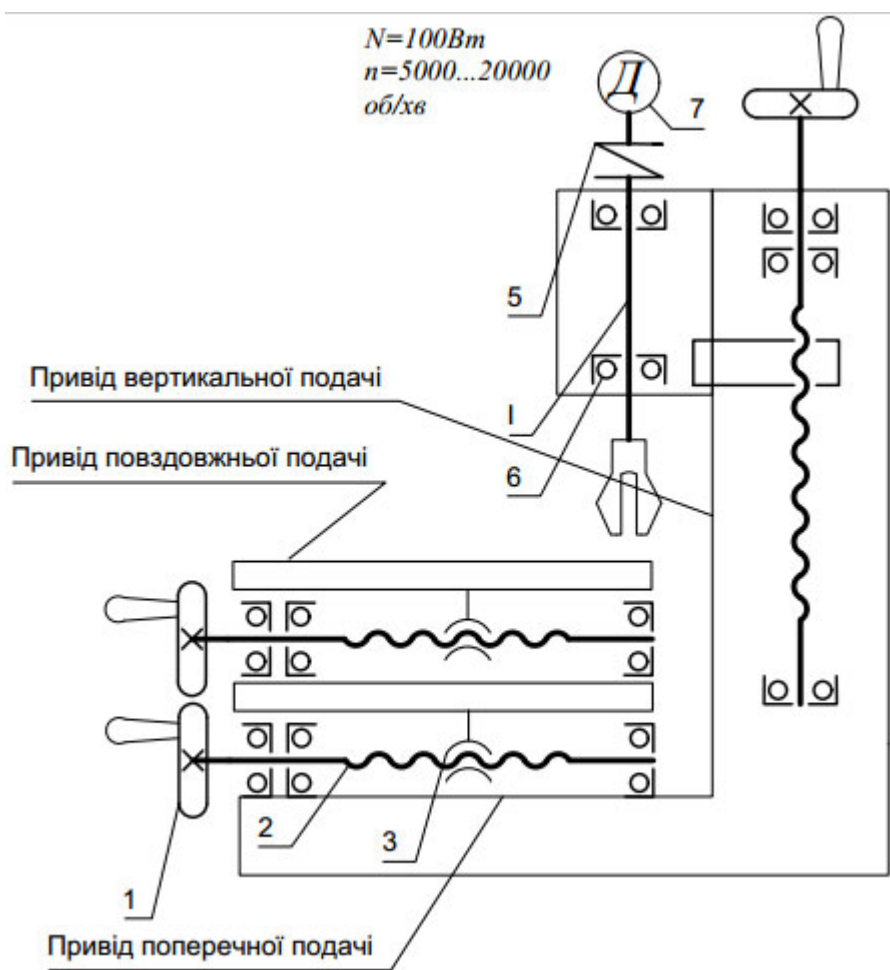
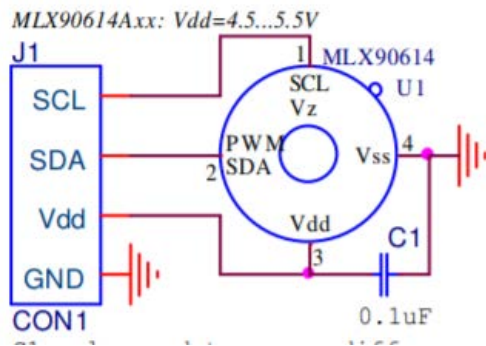


Рис. 3.1 Кінематична схема базового верстата

3.2 Вибір електронного обладнання та реалізація програмного забезпечення

Для вимірювання температури передньої опори, задньої опори, двигуна та температури вертикальної стойки був обраний безконтактний інфрачервоний датчик температури фірми Melexis - MLX90614 (рис.3.3).



а)



б)

Рис. 3.3 Електрична схема та загальний вид датчика [17]
Загальні технічні характеристики наведені в таблиці 3.2 [17].

Таблиця 3.2

Технічні характеристики датчика

Тип датчика	MLX90614ESF-BAA-000-TU-ND
Калібрування датчика	Заводське
Температура зовнішнього середовища	від -40 °C до +85 °C
Температура вимірювання	від -70 °C до +380 °C
Цифровий інтерфейс	SMBus
Точність вимірів	0.5°C для діапазону від 0 до +50°C
Роздільна здатність	0.02°C
Напруга	від 3В до 5В (вбудований стабілізатор)
Розміри	16 мм x 11 мм

Цей датчик підключається до мікроконтролера Arduino Mega по шині I2C. Arduino MEGA 2560 (Рис. 3.4) [18] – працює на базі ATmega 2560. Має 54 цифрових вхід/виходів, 16 аналогових входів, 4 послідовних портів UART. Сумісна з усіма платами розширення, розробленими для платформ Uno або Duemilanove.



Рис.3.4. Arduino MEGA 2560

Оскільки в мікроконтролері Arduino Mega наявна тільки одна шина I2C, а підключити необхідно 4 датчики було використано так званий мультиплексор, який дозволяє підключити до 8-ми пристроїв з однаковою адресою та отримувати одразу данні зі всіх підключених датчиків.

Технічні характеристики комутатора TCA9548A:

- кількість каналів: 8;
- кількість можливих адрес комутатора: 8;
- діапазон адрес комутатора: 0x70-0x77;
- напруга живлення: 1.65 В - 5.5 В;
- напруга логічних сигналів по кожному з каналів: 1.65 В - 5.5 В;
- максимальний струм: 100 мА.

Загальна схема підключення 4-датчиків до Arduino Mega з використанням мультиплексора TCA9548A зображена на рисунку 3.5.

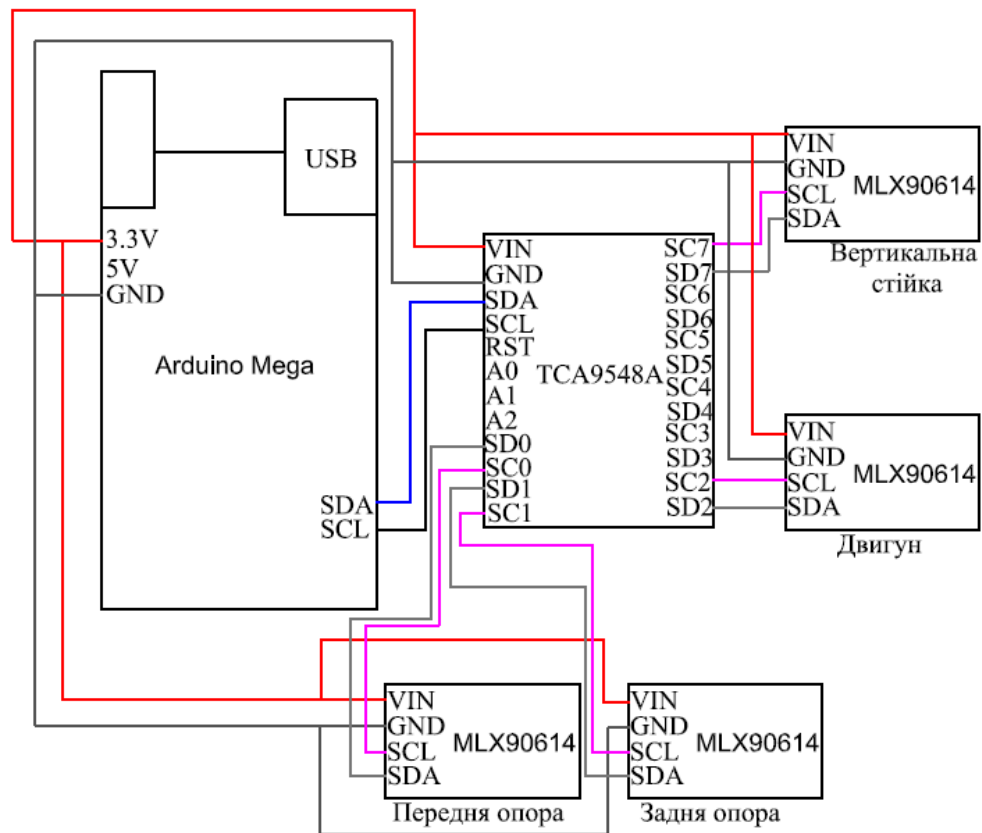


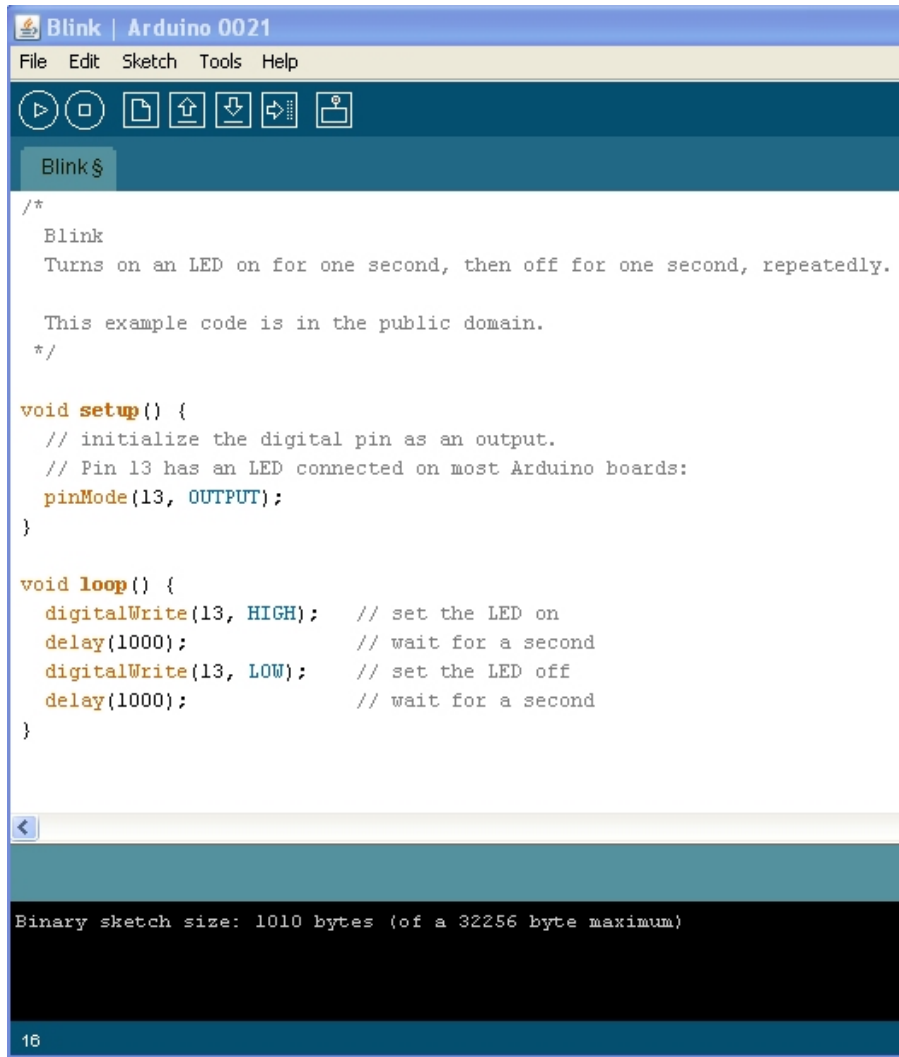
Рис.3.5 Схема підключення датчиків температури

Загальне живлення подається через USB порт з комп'ютера на мікроконтролер, потім на комутатор йде живлення 3.3 В та підключення безпосередньо шини I2C (SDA та SCL), датчик температури, який стоїть біля передньої опори підключається до виходів SD0 та SC0, датчик температури задньої опори підключається до виходів SD1 та SC1, датчик температури вертикальної стійки до SD7 та SC7 та датчик температури двигуна до SD2 та SC2.

Розробка програмного забезпечення проводилася в середовищі Arduino IDE.

Інтегроване середовище розробки Arduino [19] - це багатоплатформовий додаток на Java, що включає в себе редактор коду (рис.3.6 а), серійний монітор для їх відображення (рис.3.6 б), компілятор і модуль передачі прошивки в плату. Середовище розробки засноване на оболонці програмування Processing (рис.3.7)

на мові Wiring. Строго кажучи, це C ++, доповнений деякими бібліотеками. Програми обробляються за допомогою препроцесора, а потім компілюється.



The screenshot shows the Arduino IDE interface with the 'Blink' sketch loaded. The menu bar includes 'File', 'Edit', 'Sketch', 'Tools', and 'Help'. The toolbar contains icons for running, stopping, saving, and other functions. The code editor displays the following code:

```
/*
  Blink
  Turns on an LED on for one second, then off for one second, repeatedly.

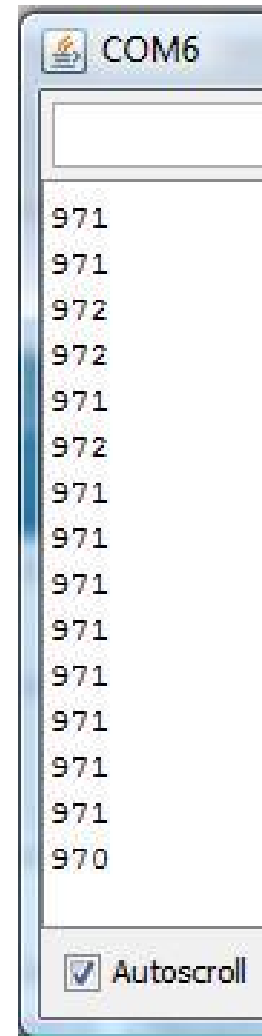
  This example code is in the public domain.
  */

void setup() {
  // initialize the digital pin as an output.
  // Pin 13 has an LED connected on most Arduino boards:
  pinMode(13, OUTPUT);
}

void loop() {
  digitalWrite(13, HIGH);  // set the LED on
  delay(1000);             // wait for a second
  digitalWrite(13, LOW);   // set the LED off
  delay(1000);             // wait for a second
}
```

At the bottom, a status bar indicates 'Binary sketch size: 1010 bytes (of a 32256 byte maximum)' and the line number '16'.

a)



The screenshot shows the Arduino Serial Monitor window titled 'COM6'. It displays the output of the Blink sketch, which consists of a series of '971' and '970' characters. The 'Autoscroll' checkbox is checked at the bottom.

```
971
971
972
972
971
972
971
971
971
971
971
971
971
971
971
970
```

б)

Рис.3.6 Середовище розробки Arduino IDE та термінал виводу інформації [19]

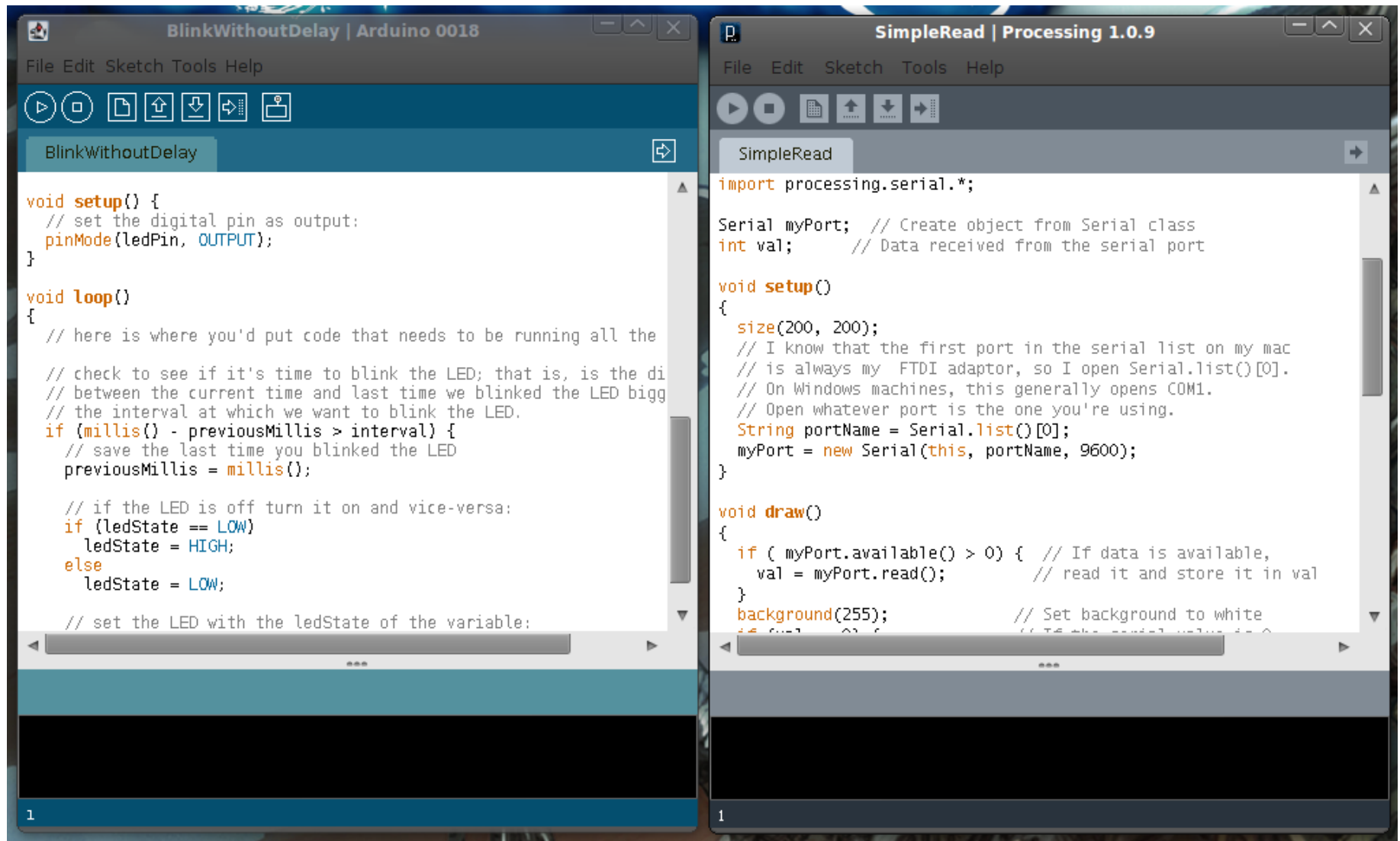


Рис 3.7. Подібність ARDUINO IDE до Processing [19]

Для роботи з датчиком температури в цьому середовищі необхідно використовувати бібліотеку Adafruit_MLX90614, яка є в вільному доступі в мережі Інтернет.

На рисунку 3.8 приведено код програми для роботи одного датчика, який підключено безпосередньо до мікроконтролера.

```
#include <Wire.h>
#include <Adafruit_MLX90614.h>
Adafruit_MLX90614 mlx = Adafruit_MLX90614();
void setup() {
    Serial.begin(9600);
    Serial.println("Adafruit MLX90614 test");
    mlx.begin();
}
void loop() {
    Serial.print("Ambient = "); Serial.print(mlx.readAmbientTempC());
    Serial.print("*C\tObject = "); Serial.print(mlx.readObjectTempC()); Serial.println("*C");
    Serial.print("Ambient = "); Serial.print(mlx.readAmbientTempF());
    Serial.print("*F\tObject = "); Serial.print(mlx.readObjectTempF()); Serial.println("*F");
    Serial.println();
    delay(500);
}
```

Рис.3.8 Код в Arduino IDE роботи одного датчика.

На рисунку 3.9 зображено фрагмент програмного коду, який було розроблено для роботи з 8-ю датчиками одночасно та отримування даних без затримки.


```

/* Initialise the 1st sensor */
tcselect(0);
if(!mlx1.begin())
{
    /* There was a problem detecting the HMC5883 ... check your connections */
    Serial.println("Ooops, no MLX90614 detected ... Check your wiring!");
    while(1);
}

/* Initialise the 2st sensor */
tcselect(1);
if(!mlx2.begin())
{
    /* There was a problem detecting the HMC5883 ... check your connections */
    Serial.println("Ooops, no MLX90614 detected ... Check your wiring!");
    while(1);
}

/* Initialise the 3st sensor */
tcselect(7);
if(!mlx3.begin())
{
    /* There was a problem detecting the HMC5883 ... check your connections */
    Serial.println("Ooops, no MLX90614 detected ... Check your wiring!");
    while(1);
}

/* Initialise the 4st sensor */
tcselect(2);
if(!mlx4.begin())
{
    /* There was a problem detecting the HMC5883 ... check your connections */
    Serial.println("Ooops, no MLX90614 detected ... Check your wiring!");
    while(1);
}
}

```

Рис.3.9 Фрагмент коду для 4-х датчиків

Повний код програми наведено в додатку А.

3.3 Визначення температури шпиндельного вузла

Виміри температури були проведенні при чотирьох частотах обертання, в режимі нагрівання-охолодження. Мета даного експерименту полягала в тому, щоб визначити час виходу верстату в стабільний тепловий режим при різних частотах.

Частоти на яких працював верстат 5000 об/хв, 9000 об/хв, 16 000 об/хв та 20 000 об/хв. Порядок проведення експерименту:

- встановлення постійної частоти обертання;
- підключення вимірювального комплексу до ноутбука;
- перевірка працездатності кожного датчика;
- вимірювання температури навколишнього середовища;
- вмикання верстата та запис температури з дискретністю 1 хв.

На рисунку 3.10 представлена схема встановлення інфрачервоних датчиків температури. Кожен датчик (1) встановлюється в корпус (2), який в свою чергу встановлюється на різьбовій шпильці М8 (3).

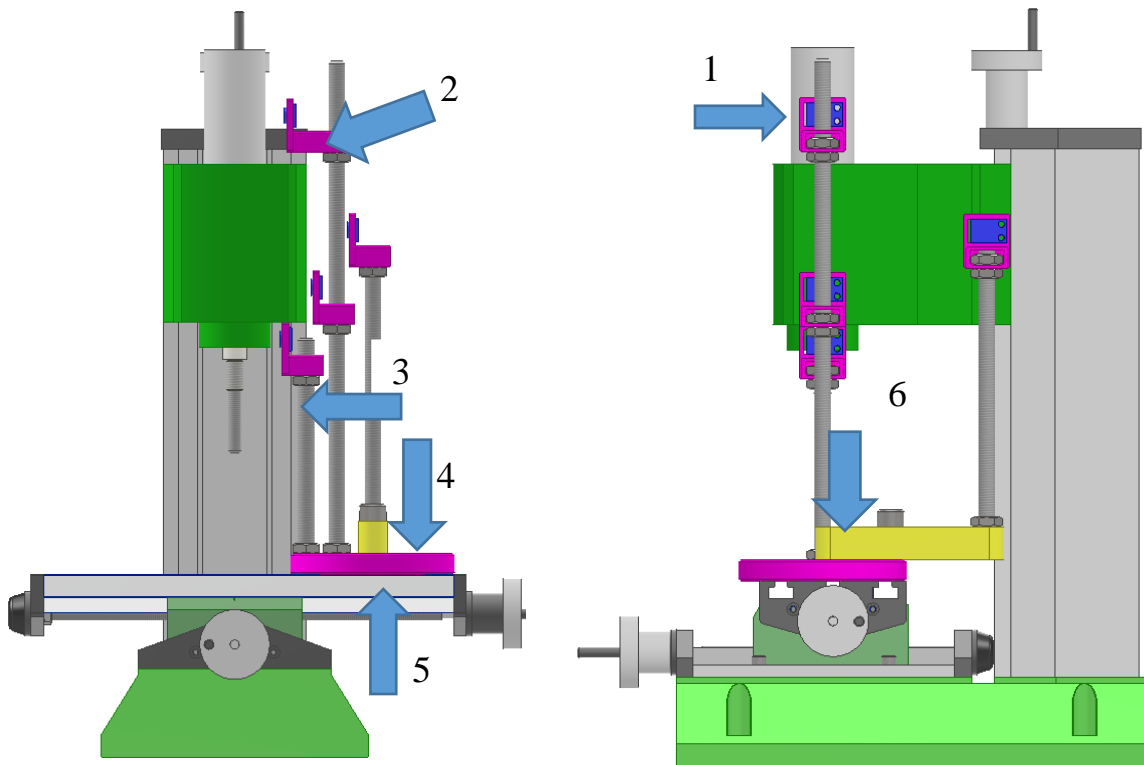


Рис. 3.10 Схема встановлення датчиків температури MLX90614

За допомогою шпильки можна регулювати висоту встановлення датчика. Самі шпильки були закріплені на круглій пластині (4), яка в свою чергу кріпилася на хрестовому столі (5). Кріплення шпильки для датчика, який вимірював температур вертикальної стойки, відбувалося на додатковій пластині (6). Це

пов'язано з тим, що датчик необхідно було винести за межі хрестового столу та забезпечити окреме регулювання відстані між датчиком та стійкою. Всі необхідні для кріплення датчика деталі були надруковані на 3-D принтері, матеріал пластику PLA.

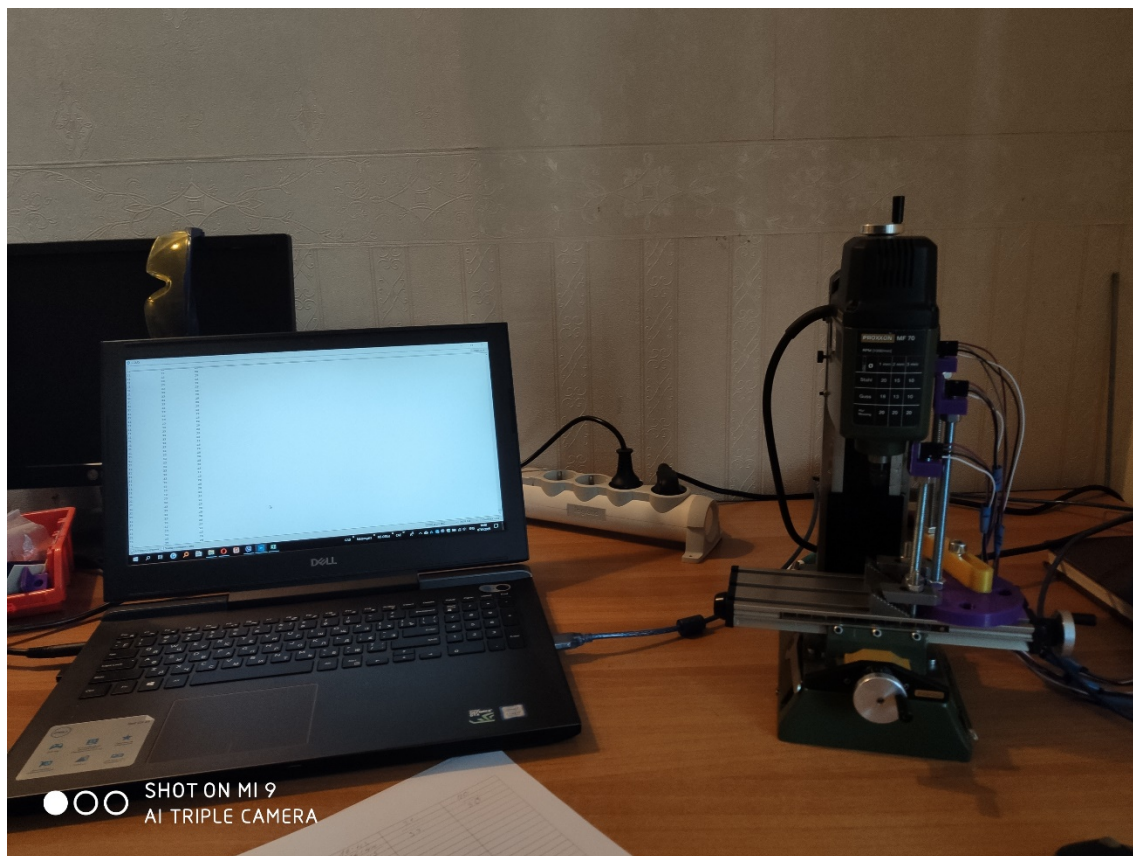


Рис. 3.11 Загальний вигляд експериментального стенду на базі верстату Proxxon MF70

Паралельно з записом даних в тимчасовий текстовий файл також вівся протокол випробувань, куди записувалися всі отримані температури з 4-датчиків. Протоколи наведені в додатку Б.

На рисунках 3.12-3.15 приведені графіки залежності температури від часу.

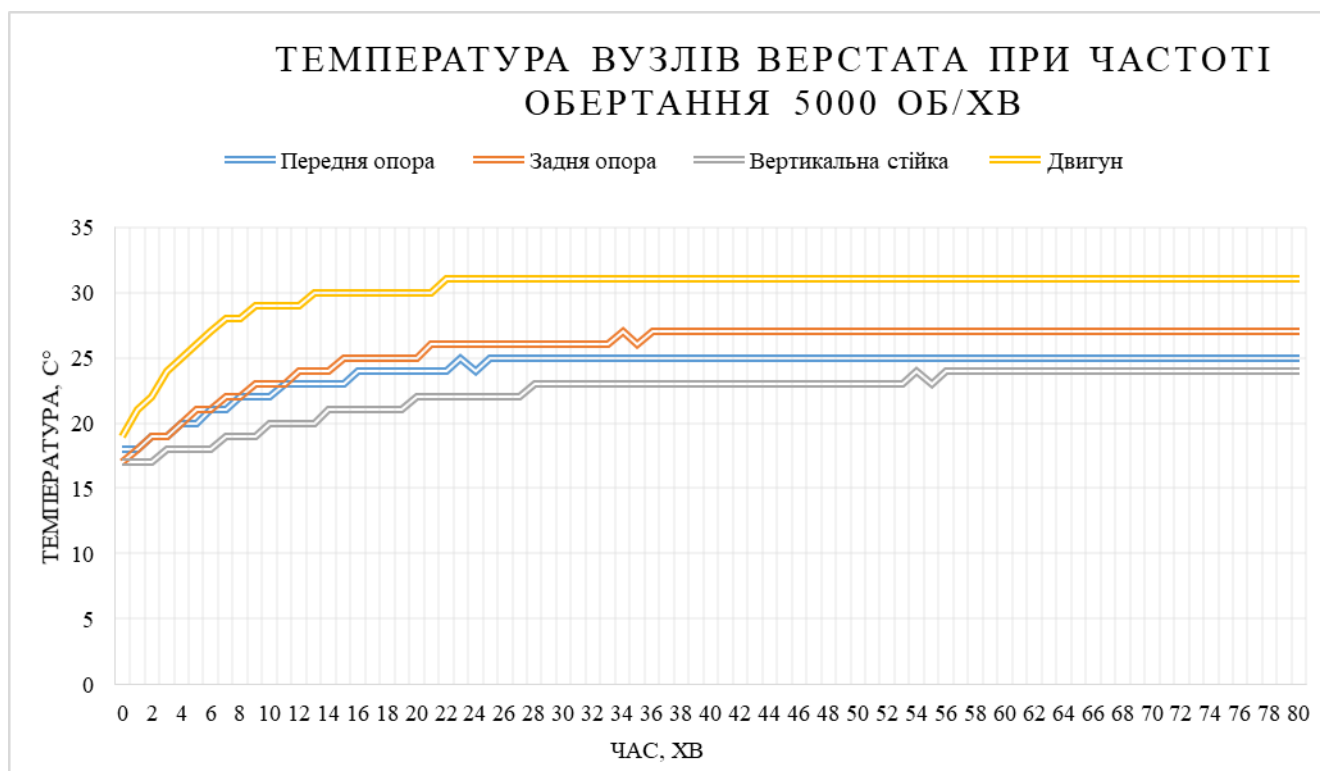


Рис.3.12 Графік залежності температури від часу при 5000 об/хв

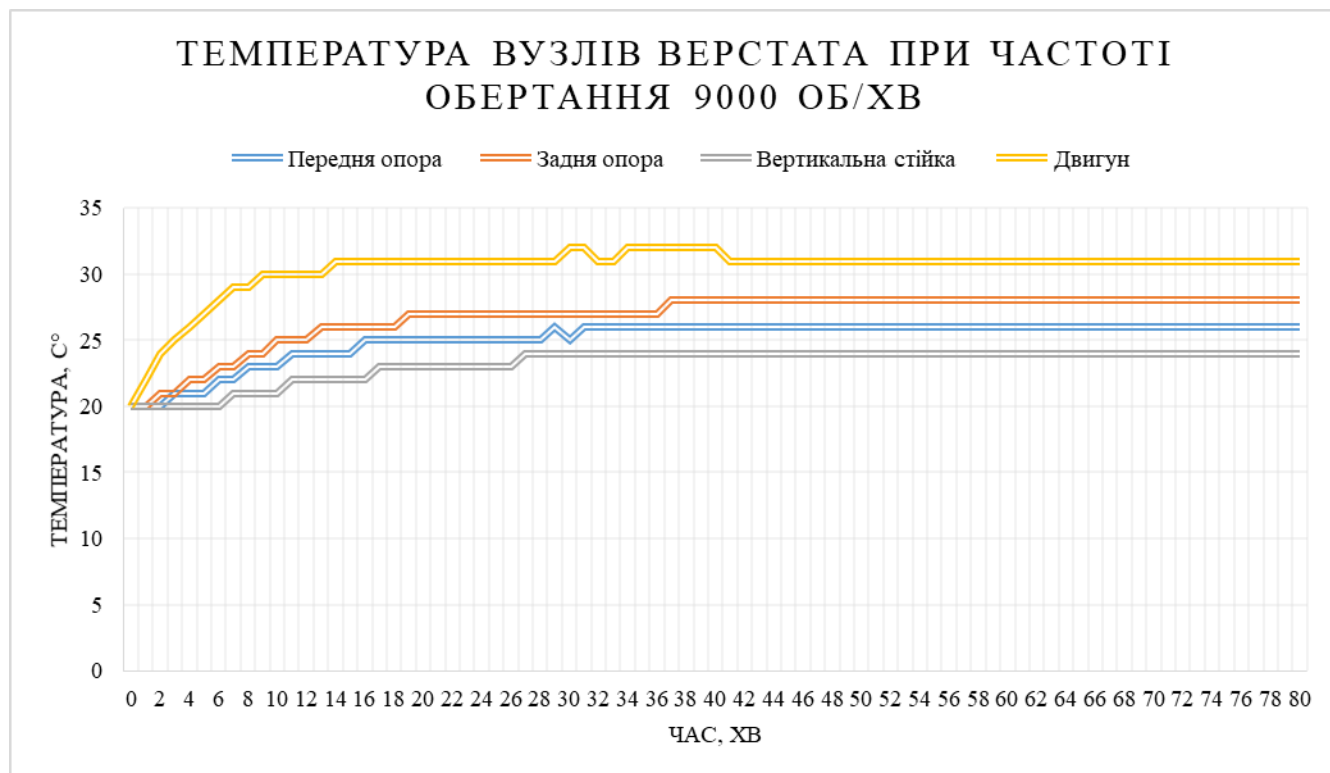


Рис.3.13 Графік залежності температури від часу при 9000 об/хв

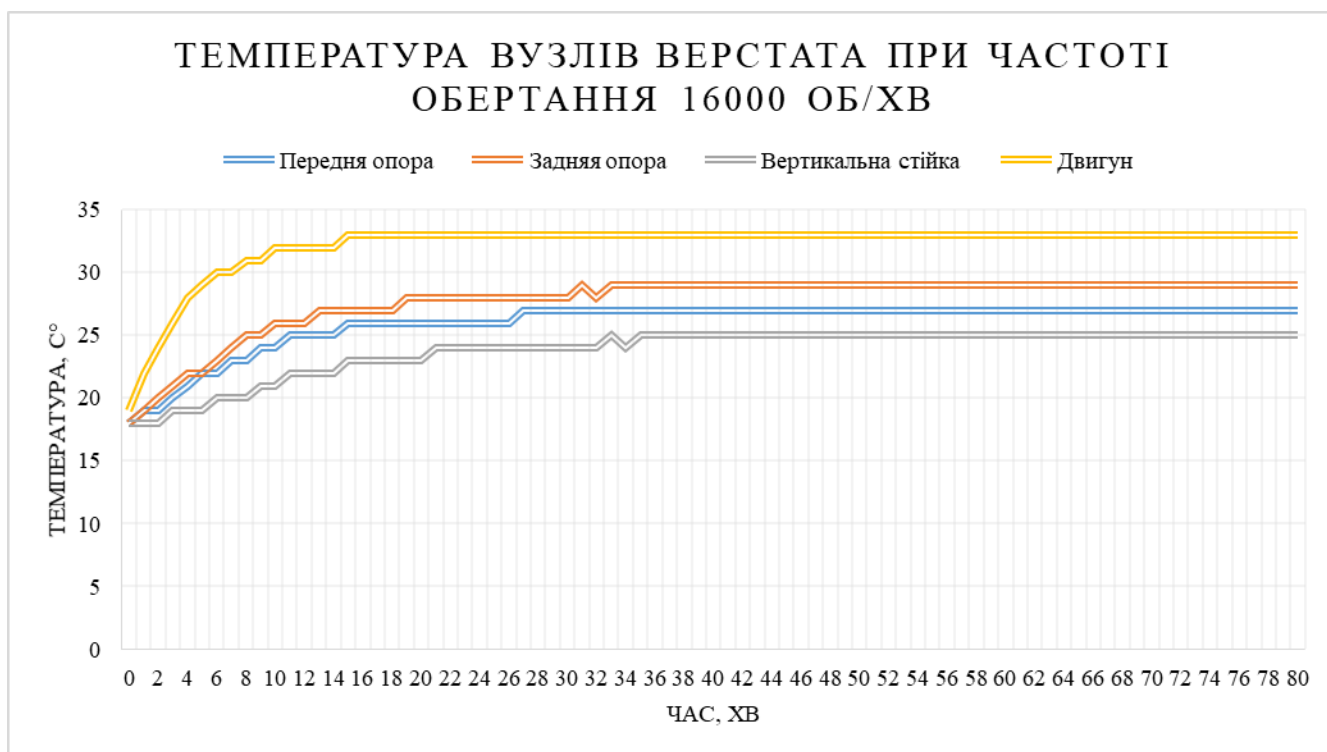


Рис.3.14 Графік залежності температури від часу при 16 000 об/хв

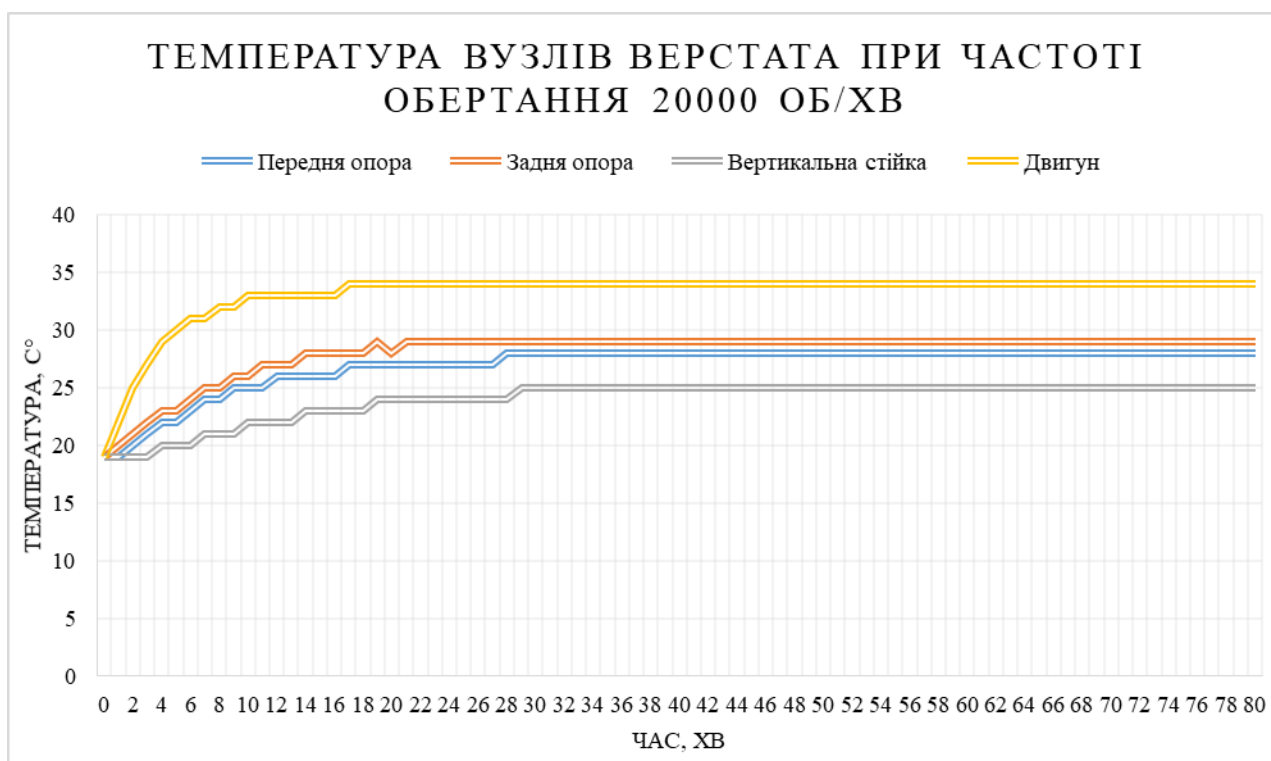


Рис.3.15 Графік залежності температури від часу при 20 000 об/хв

З отриманих графіків видно, що при частоті обертання 5000 об/хв верстат виходить на стабільний тепловий режим через 56 хвилини, при 9000 об/хв – через 41 хвилину, при 16 000 об/хв – через 36 хвилин та при 20 000 об/хв – через 28 хвилин. Слід зауважити, що повільніше нагріваються вертикальна стойка та задня опора. Також необхідно приділити увагу тому, що температура задньої опори вища в середньому на 2 С° ніж температура передньої опори. Як показує практика та досліди, зазвичай передня опора несе найбільше навантаження і тому нагрівається більше, ніж задня. В нашому випадку це пояснюється тим, що між задньою опорою та фланцем двигуна може бути наявне тертя або вона закріплена з надлишковим натягом, що тим самим збільшує силу тертя і, відповідно, температуру. Найпростішими шляхами запобігання цьому явищу може слугувати встановлення підшипника із зменшеним натягом або ізоляція фланцю двигуна прокладкою, яка не буде пропускати велику кількість тепла. Також можливо інтегрувати систему водяного чи повітряного охолодження, але для конкретного досліджуваного верстату це буде економічно недоцільно, оскільки він має малі габарити, а наявність будь-якого додаткового обладнання зробить цей верстат не конкурентоспроможним на ринку.

3.4 Вимірювання відхилення шпиндельного вузла

Вимірювання відхилення шпиндельного вузла відбувалося індикаторами часового типу з ціною поділки шкали 0.002 мм, які були встановлені перпендикулярно до осі шпинделя в площині Ох та Оу. Вимірювання температури відбувалося тим самим датчик що і в попередньому експерименті.

Схема встановлення датчиків та індикаторів зображена на рисунку .

Оскільки відомо час повної теплової стабілізації, то ці випробування виконувалися протягом 80 хв при трьох частотах: 5000 об/хв, 11 000 об/хв та 20 000 об/хв.

План експерименту:

- встановлення постійної частоти обертання;
- підключення вимірювального комплексу до ноутбука;
- перевірка працездатності кожного датчика;
- відведення ніжки від оправки, яка закріплена в шпинделі;
- запуск шпинделя;
- кожні 10 хв виміри відхилення, їх запис до протоколу та фотографування кожного відхилення (додаток Б);
- після теплової стабілізації верстату, виключити шпиндель та дати час для його охолодження;
- такий алгоритм провести для кожної частоти обертання.

Індикатори були жорстко закріплені на Г-подібних стойках (рис.3.16) (1) та (2). Для індикатора осі Х було виготовлено з прутка стойку (4), на яку кріпився зажим (3) з індикатором. Після встановлення шпинделя в умовний нуль, були підведені ніжки індикатора для того, щоб виставити нуль на індикаторі, після цього ніжки знову були відведені від шпинделя. Кріплення датчиків дещо відрізняється від кріплення в минулому випробуванні. Була замінена пластина 5 (рис.3.16), на

якій кріпилися різьбові шпильки. Всі деталі були надруковані на 3-D принтері, матеріал – PLA.

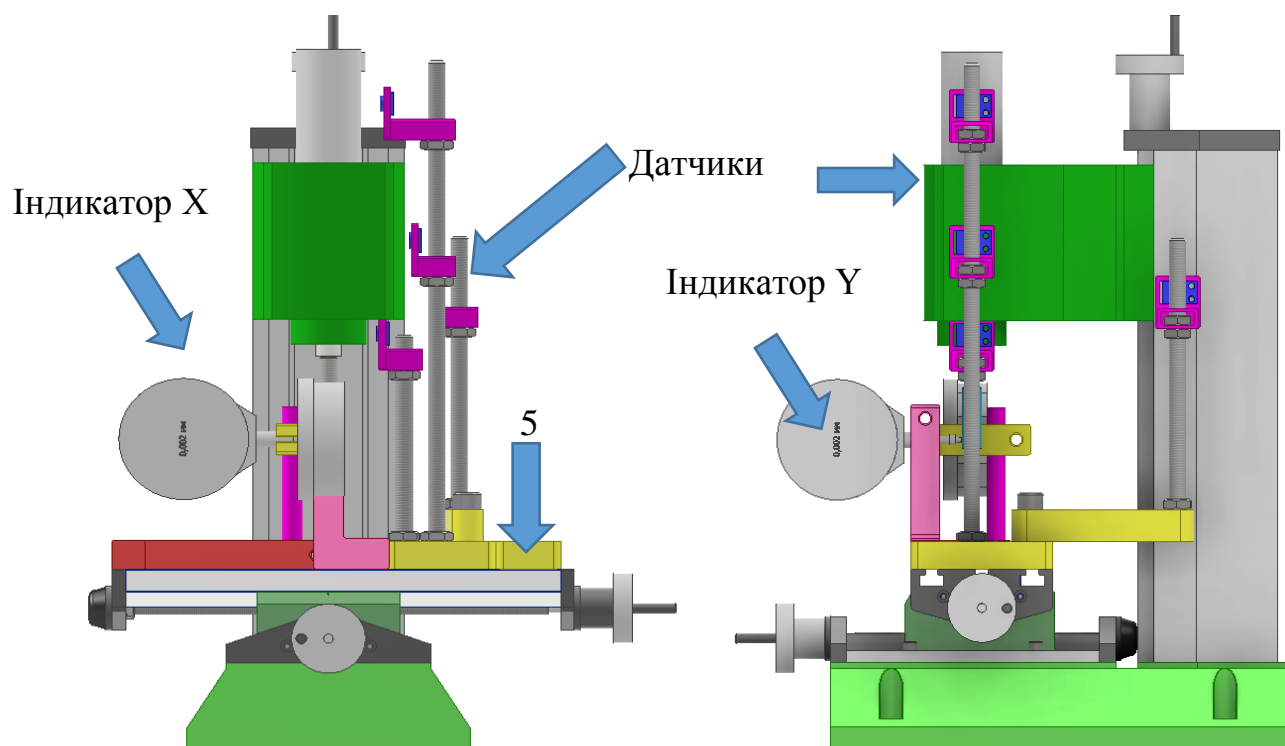


Рис.3.16 Схема встановлення індикаторів та датчиків температури

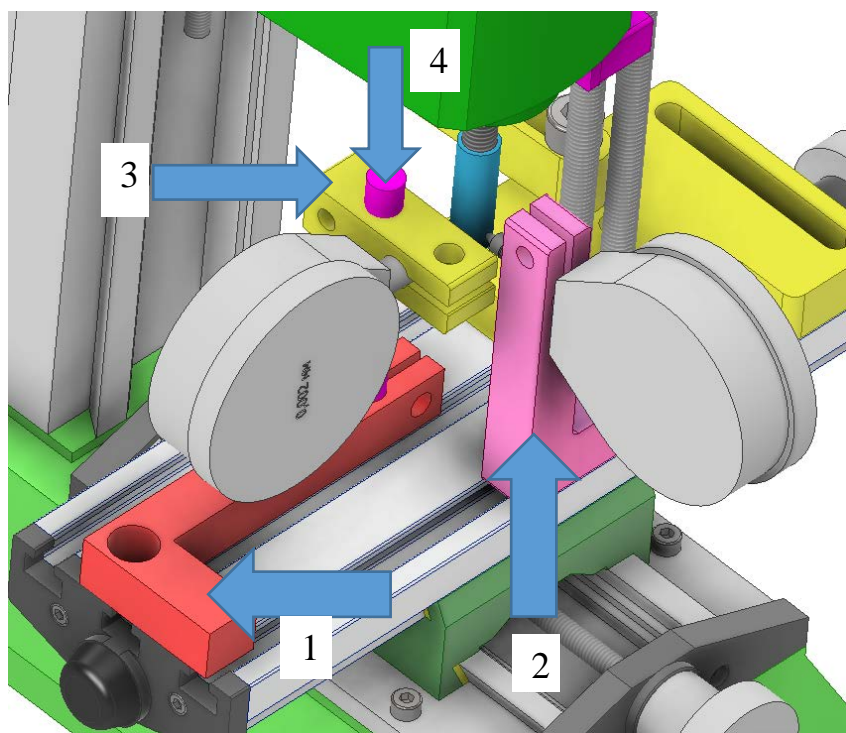


Рис.3.17 Кріплення індикаторів часового типу

На рисунках 3.18 та 3.19 показано загальний вигляд експериментального стенду та його електронну частину.



Рис.3.18 Загальний вид верстату з вимірювальним обладнанням

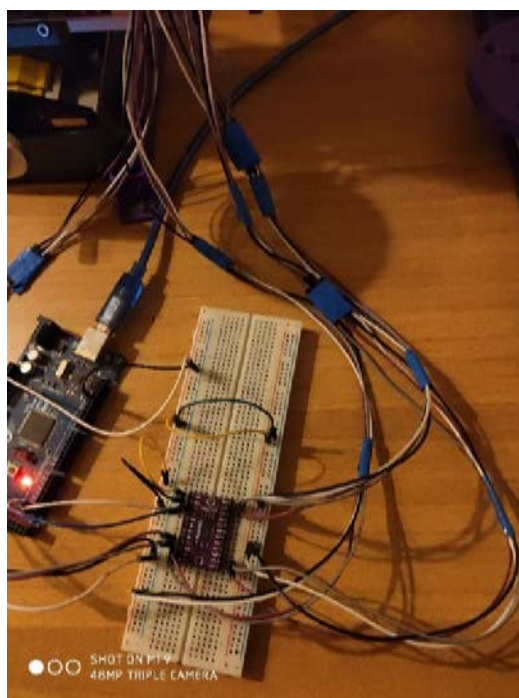


Рис.3.19 Мікроконтролер та комутатор

На рисунках 3.20-3.21 приведені графіки залежності відхилення від часу при різних частотах обертання.

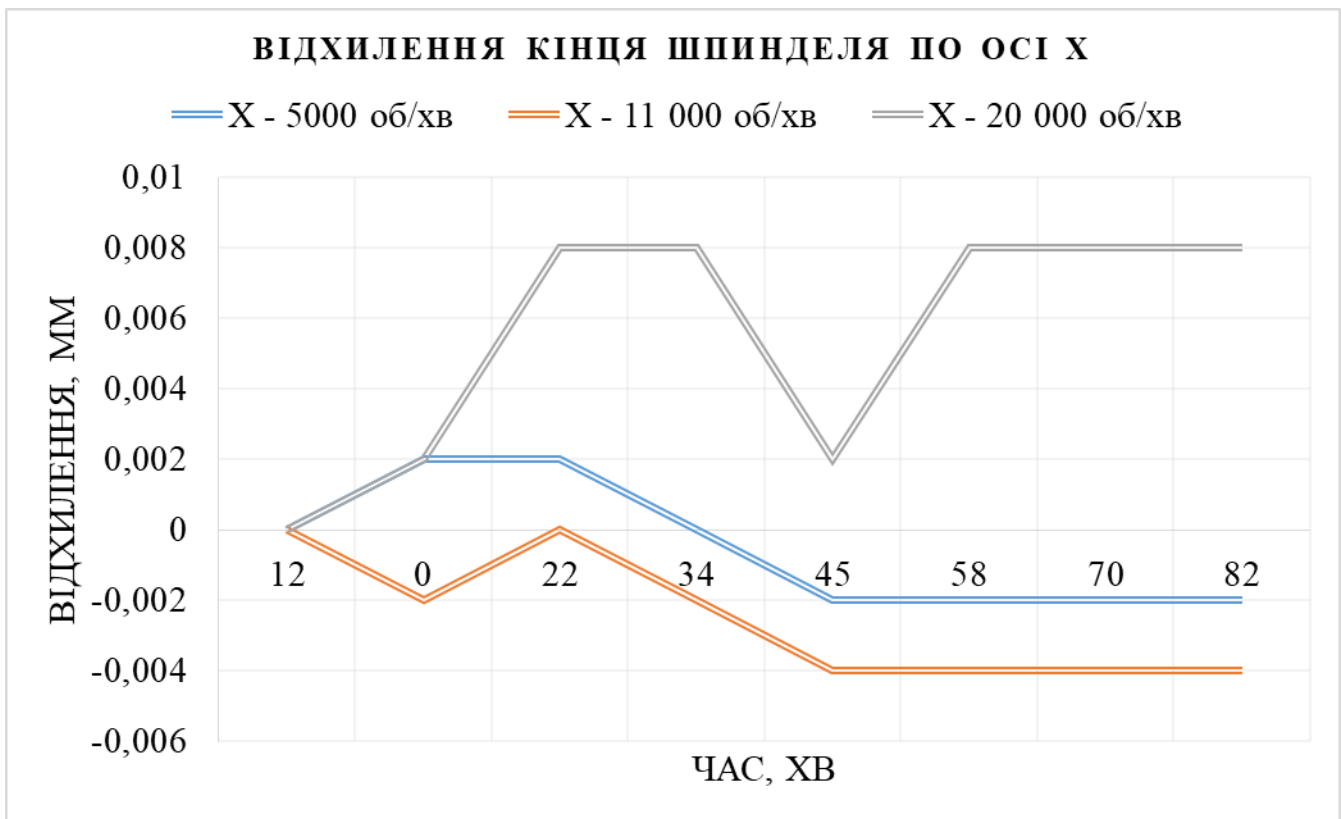


Рис.3.20 Графік залежності відхилення по осі Х від часу

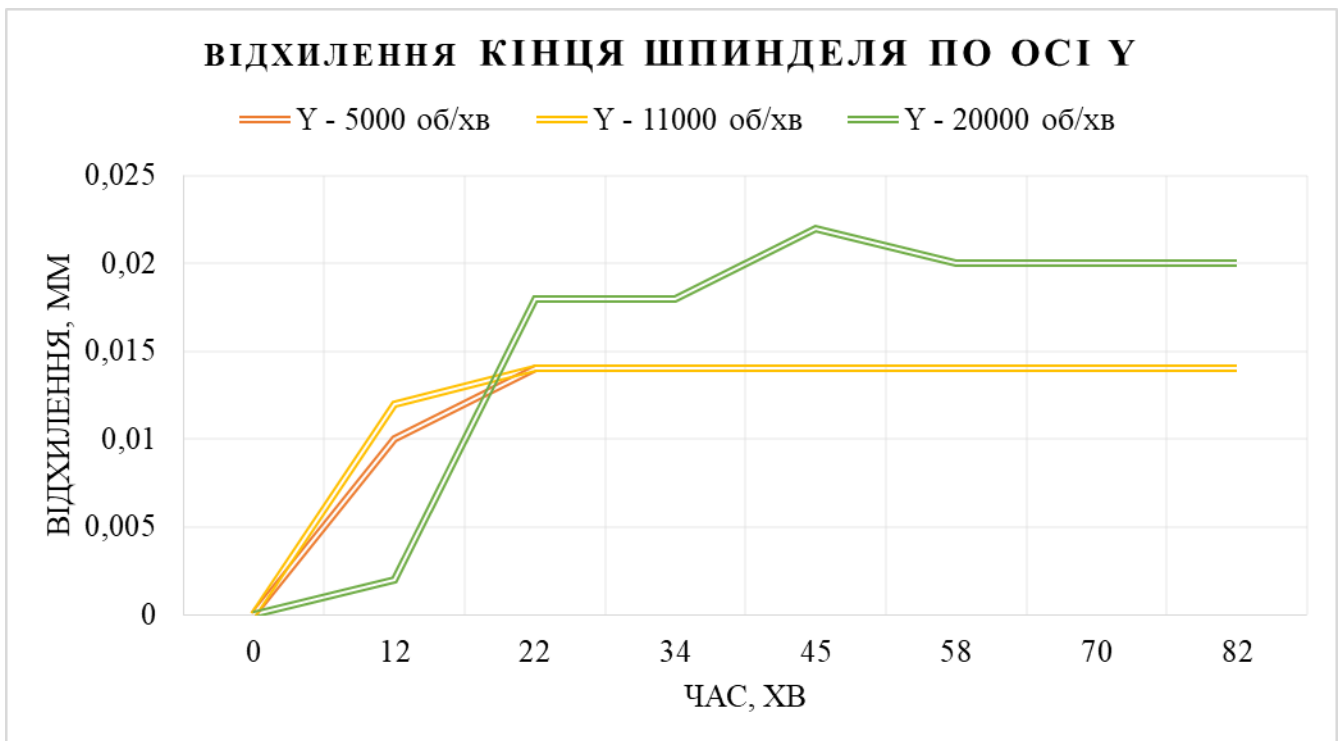


Рис.3.21 Графік залежності відхилення по осі Y від часу

Температура зовнішнього середовища під час випробувань становила 20 °С. Як видно з графіків, найбільше відхилення шпинделя протягом 82 хвилин роботи відбувалося відносно осі Y при частоті обертання 20 000 об/хв та становить 0,02 мм. Відхилення відносно осі Y при частотах обертання 5000 об/хв та 11 000 об/хв майже однакове – 0,014 мм. Щодо відхилення відносно осі X, то при 5000 об/хв шпиндель відхилявся в праву сторону на 2 мкм, при 11 000 об/хв відхилення в тому ж напрямку – 4 мкм, а при 20 000 об/хв відхилення змінило напрям та становило 8 мкм.

Можна зроби висновок, що дані відхилення не виходять за межі обіцяної виробником точності 0,05 мм.

На рисунках 3.22 та 3.23 зображено графіки залежності переміщення від температури. Можна побачити залежність переміщення від температури, оскільки при температурній стабілізації зміщення шпинделя не має.

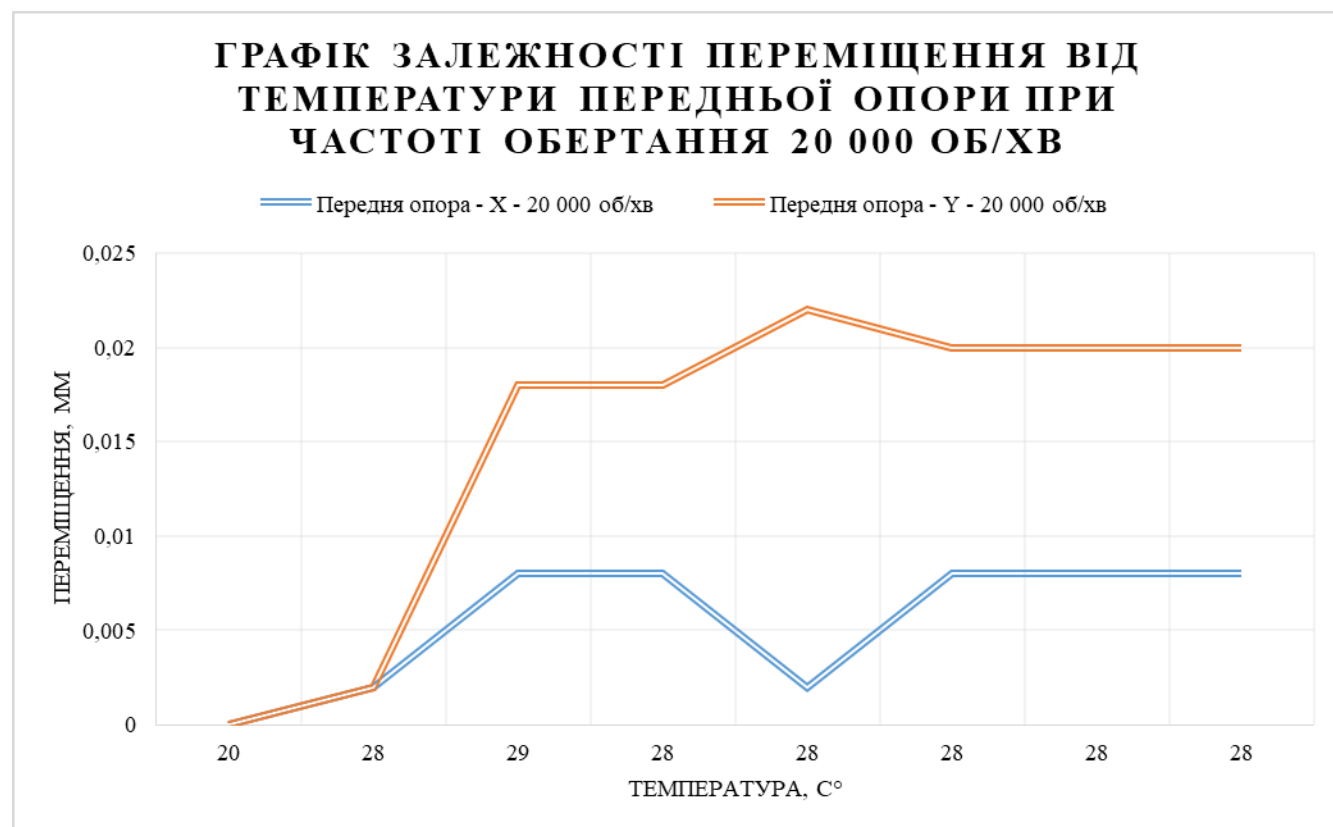


Рис. 3.22. Графік залежності переміщення від температури передньої опори

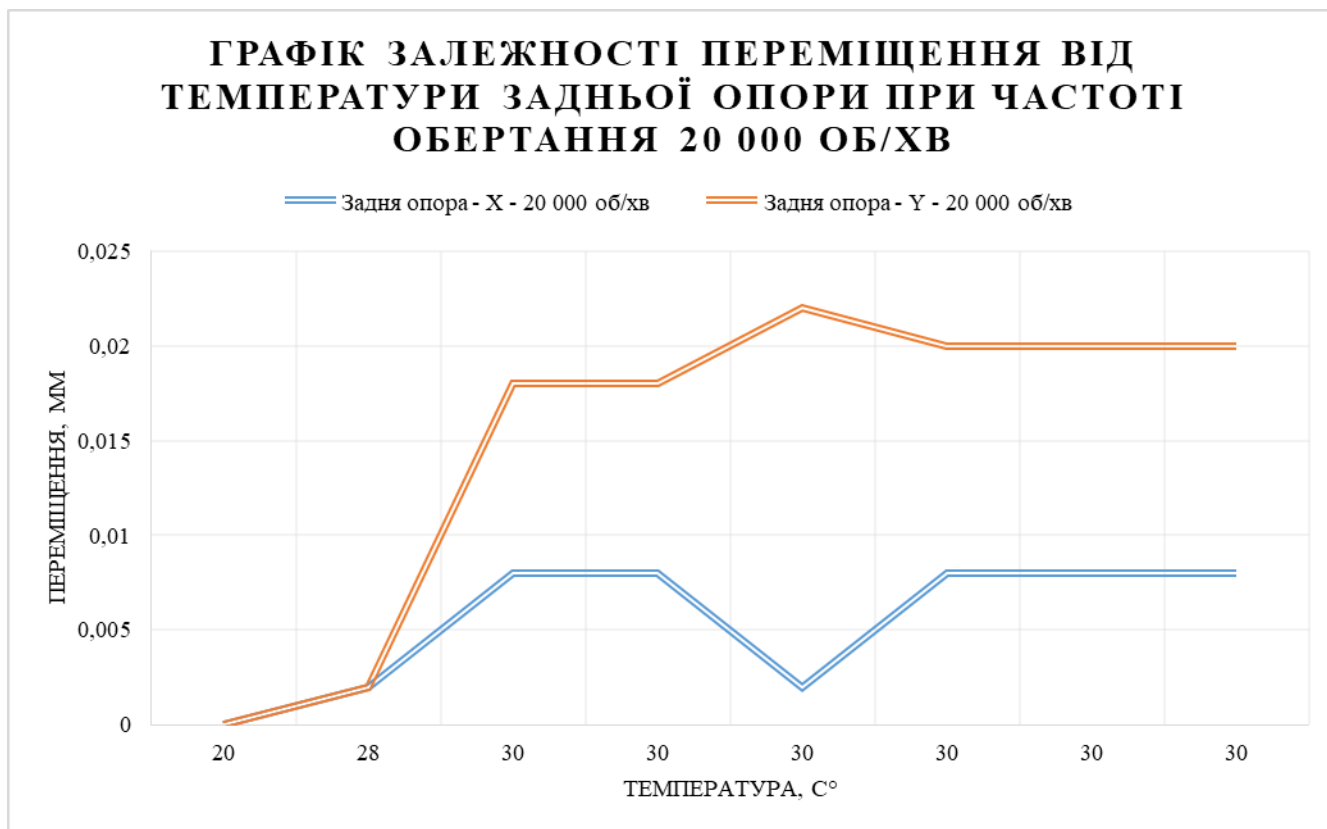


Рис. 3.23. Графік залежності переміщення від температури задньої опори

3.5 Висновки по розділу

Розроблено експериментальний комплекс, який дозволяє вимірювати температуру інфрачервоними датчиками MLX90614 з використанням комутатора ТСА9548А на базі мікроконтролера Arduino Mega. Крім цього спроектовано засоби кріплення датчиків та індикаторів часового типу. Всі необхідні деталі були надруковані на 3-D принтері з використанням технології FDM, матеріал – PLA.

Проведені виміри дозволили визначити час теплової стабілізації мікрофрезерного верстату Proxxon MF 70, який для частот 5000 об/хв, 9000 об/хв, 16000 об/хв та 20 000 об/хв становив 56 хв, 41 хв, 36 хв та 28 хв відповідно.

Вимірювання відхилень шпинделя показало, що найбільше відхилення при частоті обертання 20 000 об/хв та становить по осі X – 8 мкм та по осі Y – 0,02 мм.

Отже, можна зробити висновок, що при тривалій роботі верстат не виходить за межі точності, яку гарантує виробник (0.05 мм).

4. МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ДЕФОРМАЦІЙ ШПИНДЕЛЬНОГО ВУЗЛА

4.1 Обґрунтування вибору методу розрахунку

Метою математичного моделювання є аналіз і виявлення основних закономірностей впливу температурних деформацій шпинделя від теплового потоку і теплової потужності, яка виникає в зоні контакту деталей. У ході дослідження були прийняті наступні допущення:

Як вже було сказано раніше для поліпшення теплового режиму були проведені широкі дослідження різними авторами та розроблені методи розрахунку температурних полів. Одним з кращих вважається метод скінченних елементів (МСЕ). МСЕ у наш час є загальноновживаним при розв'язку завдань механіки твердого тіла за допомогою чисельних алгоритмів. МСЕ зайняв лідируюче положення завдяки можливості моделювати широке коло об'єктів та явищ. Абсолютна більшість конструктивних елементів, вузлів і конструкцій, виготовлених з найрізноманітніших матеріалів, що мають різну природу, можуть бути розраховані за допомогою МСЕ. При цьому, зрозуміло, потрібно враховувати неминучі при будь-якій чисельній апроксимації умовності й похибки. Тому питання відповідності між розрахунковою моделлю й реальністю є, мабуть, основним при використанні програм аналізу.

В основі методу лежить дискретизація об'єкта (побудова дискретної моделі безперервної об'єкта та наступний синтез регулятора методами теорії дискретних систем) з метою розв'язку рівнянь механіки суцільного середовища в припущенні, що ці співвідношення виконуються в межах кожної з елементарних областей. Ці області називаються кінцевими елементами. Вони можуть відповідати реальній частині простору, як, наприклад, просторові елементи (рисунок 4.1, 4.2), або ж бути математичною абстракцією, як елементи стрижнів, балок, пластин або оболонок

(рисунок 4.3). У межах кінцевого елемента призначаються властивості ділянки, що обмежується їм, об'єкта (це можуть бути, наприклад, характеристики твердості й міцності матеріалу, щільність, температуропровідності і т.д.) і описуються поля величин, що цікавлять (стосовно до механіки твердого тіла це переміщення, деформації, напруги і т.д.).

Приклади кінцевих елементів, що є в Autodesk Inventor Nastran, наведені на рисунках: об'ємний тетраедральний з лінійним полем переміщень у межах області, що обмежується їм (і, відповідно, постійною деформацією) - на рисунку 4.2, об'ємний тетраедральний з параболічним полем переміщень (лінійним розподілом деформацій) - на рисунку 4.3, трикутний елемент оболонки з параболічним полем переміщень і кутів повороту - на рисунку 4.4. На рисунках також позначені локальна система координат елемента ξ, ψ, η , глобальна система координат тіла X, Y, Z , переміщення в локальній: u, v, w , для оболонкового також кути повороту щодо локальних осей у вузлі $\Theta_\xi, \Theta_\psi, \Theta_\eta$ й у глобальній: U, V, W системах координат.

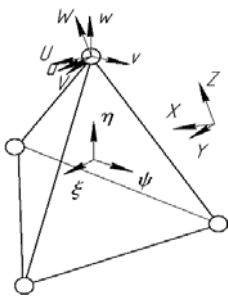


Рис.4.1 - Об'ємний лінійний кінцевий елемент

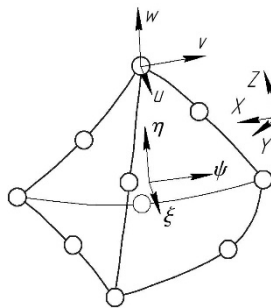


Рис.4.2 - Об'ємний параболічний кінцевий елемент

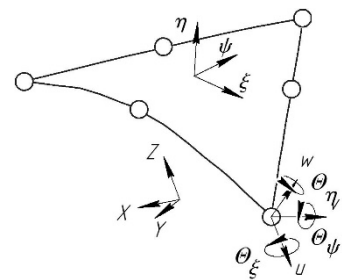


Рис.4.3 - Параболічний кінцевий елемент поверхні

В минулому це був трудомісткий розрахунок, але зараз розроблені системи автоматизованого проектування (САПР) які безпосередньо зв'язані з розробкою окремих підсистем. Як показує аналіз існуючих САПР, центральною, що визначає

структуру всієї системи проектування, є підсистема розрахунків. Актуальний вид таких розрахунків є тепловий.

Однією з найпоширеніших програм, яка містить в собі модуль розрахунку теплових деформацій (Nastran) є Autodesk Inventor. Вхідними параметрами для розрахунку є: матеріал шпинделя, температура, конвекція, теплова потужність, тепловий потік, види контактів (з'єднання шпинделя з підшипниками, зубчатими колесами тощо). Результатом цих розрахунків є візуалізація деформування шпинделя.

4.2 Розрахунок шпиндельного вузла в Autodesk Inventor Nastran

Для розрахунку шпиндельного вузла верстата Proxxon MF70 був створений термічний аналіз 3-D моделі, яка складалась з 3-х твердих тіл. В місцях контакту шарикової опори була прикладена температура, яку виміряли в натурному експерименті. Для розрахунку зміщень по осі Z система координат, яка вказана на моделях має центр, що знаходиться в зоні мінімальних температур по довжині шпинделя (визначається програмою автоматично), тобто ми отримали зміщення шпинделя по обидва боки від центру, а для розрахунку сумарних зміщень центр координат знаходиться на торці шпинделя.

На рисунку 4.4 зображено схему прикладання температури.

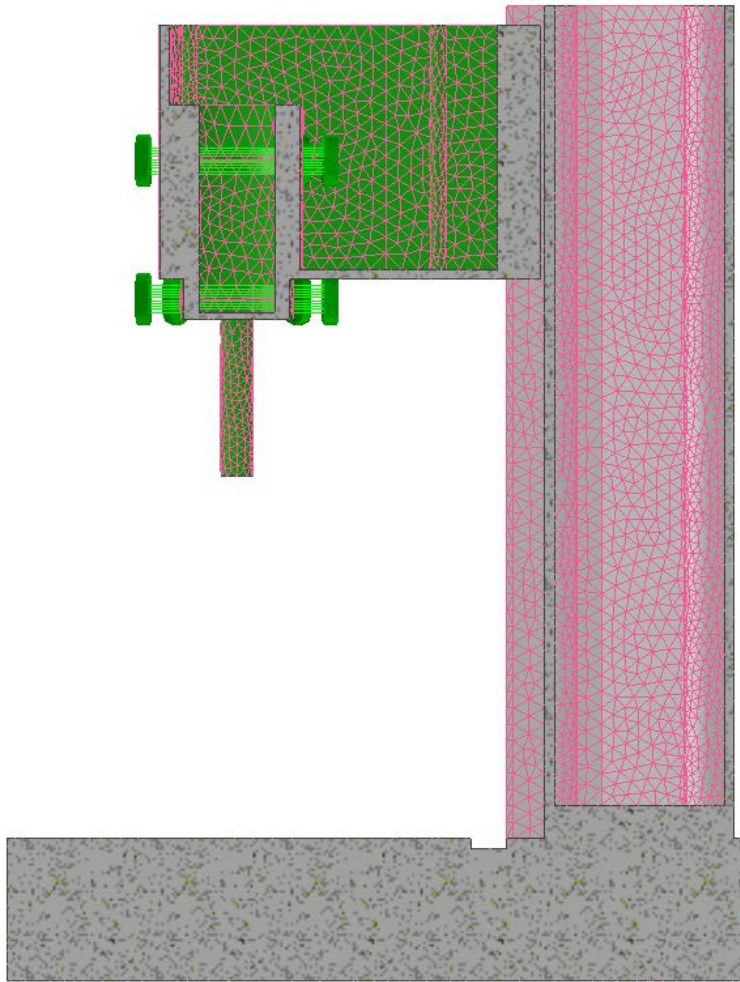


Рис.4.4 Схема прикладання температури

Наступним етапом було:

- призначення матеріалу тілам моделі;
- призначення граничних умов;
- створення сітки.

Autodesk Inventor Nastran передбачає використання матеріалів, які відповідають міжнародному стандарту (ISO) або матеріалів з узагальненими характеристиками, які рекомендує сама програма. Оскільки не відомо конкретної марки матеріалу верстату, а тільки те що вертикальна стойка та шпиндельна бабки виготовленні з алюмінію, а станина з чавуну, було обрано приблизні матеріали з узагальненими характеристиками.

Дане програмне забезпечення пропонує різноманітні типи граничних умов (рис.4.5).

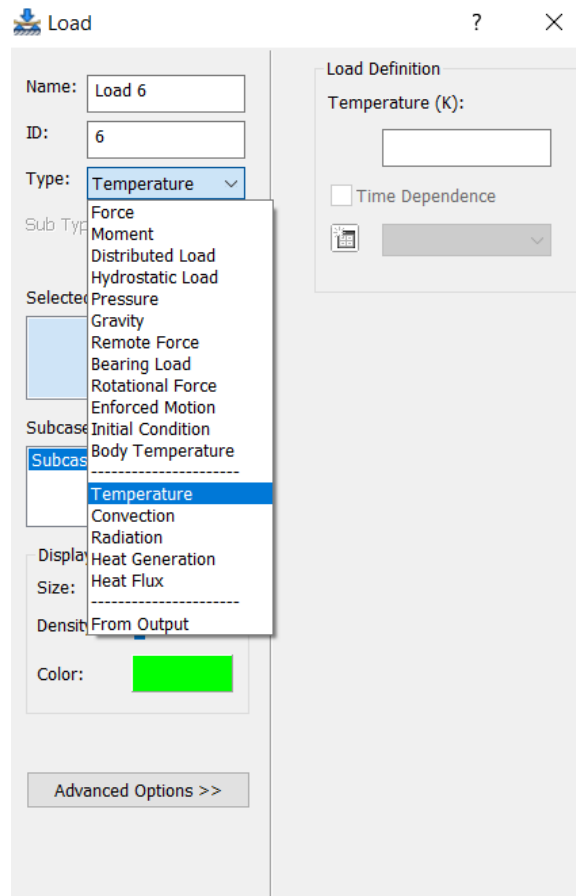


Рис.4.5 Типи граничних умов для теплового розрахунку

Оскільки було проведено експеримент в якому ми визначили температуру в характерних точках, то в місцях кріплення підшипників було прикладено температуру (в градусах Кельвіна).

Безпосередньо після визначення фізичних властивостей розрахункової моделі необхідно згенерувати сітку. Nastran підтримує 3 типи сітки: лінійний (Line Elements), плоский (Shell Elements) та об'ємний (Solid Elements). Виходячи з того, що в нас об'ємна модель було обрано Solid Elements (рис.4.6). Розмір елементів – 5 мм. Генерування сітки відбувається автоматично. Після чого можна робити розрахунок. В Nastran є вікно в якому можна бачити хід розв'язку, помилки та кількість елементів.

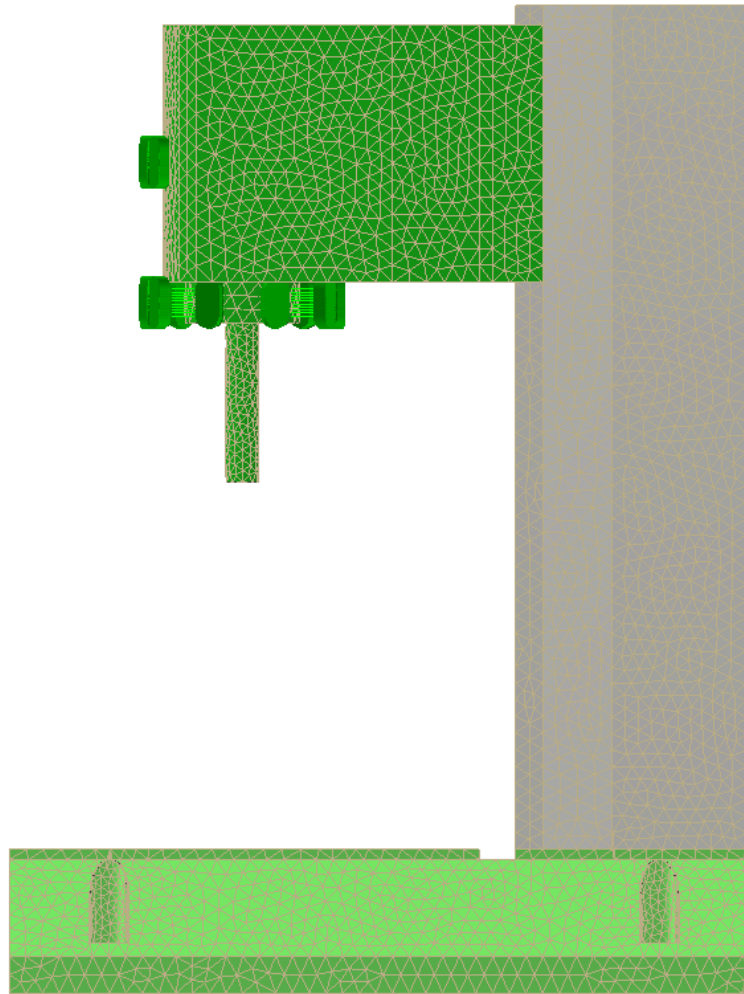


Рис.4.6 Побудована сітка

При побудові сітки отримали 219732 – вузлів (точок в яких з'єднуються декілька кінцевих елементів) та 138911 – кінцевих елементів.

Результати прикладання температури в тепловому аналізі зображено на рисунку 4.7.



Рис.4.7 Результати прикладання температури

Оскільки нам необхідно визначити зміщення шпинделя при виниканні температури, потрібно зробити розрахунок задачі термопружності. Є два методи розв'язку такої задачі – зв'язна задача та незв'язна задача. Зв'язна задача – це коли розраховуються рівняння рівноваги та рівняння енергії одночасно, незв'язна задача – рівняння розраховуються окремо.

В Nastran було розраховано спочатку рівняння енергії потім рівняння рівноваги. Для розрахунку зміщень, які виникають від температури необхідно створити статичний аналіз в якому задати наступні навантаження: навантаження від температури задається з файлу результатів попереднього аналізу, задається початкова температура та температура тіла. Крім цього необхідно станину жорстко закріпити (рис.4.8).

На рисунках 4.9-4.11 зображено результати розрахунку зміщення відносно осі X, Y та Z.

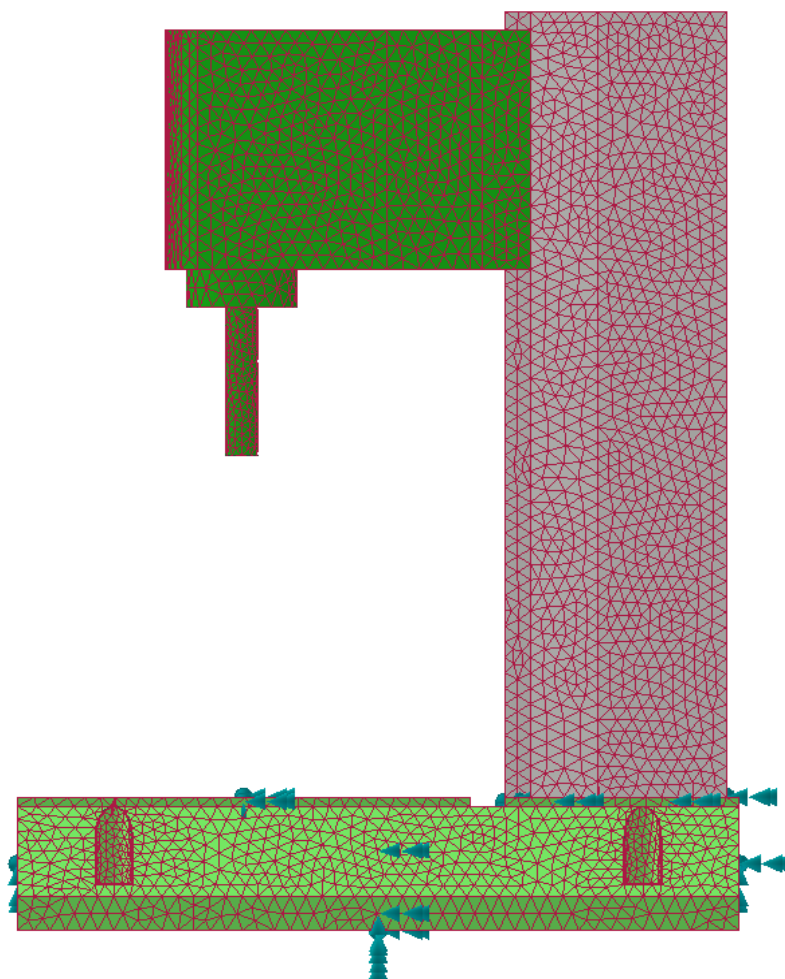
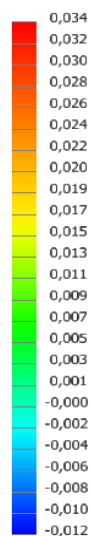


Рис.4.8 Моделювання закріплення верстата

Displacement ▾ ALONG Z-AXIS ▾ mm ▾ ⚙



Y
Z

CONTOUR: DISPLACEMENT (mm) (TZ)
DEFORMED TOTAL: (MIN=0, MAX=0,0669305)
OUTPUT SET: SUBCASE 2

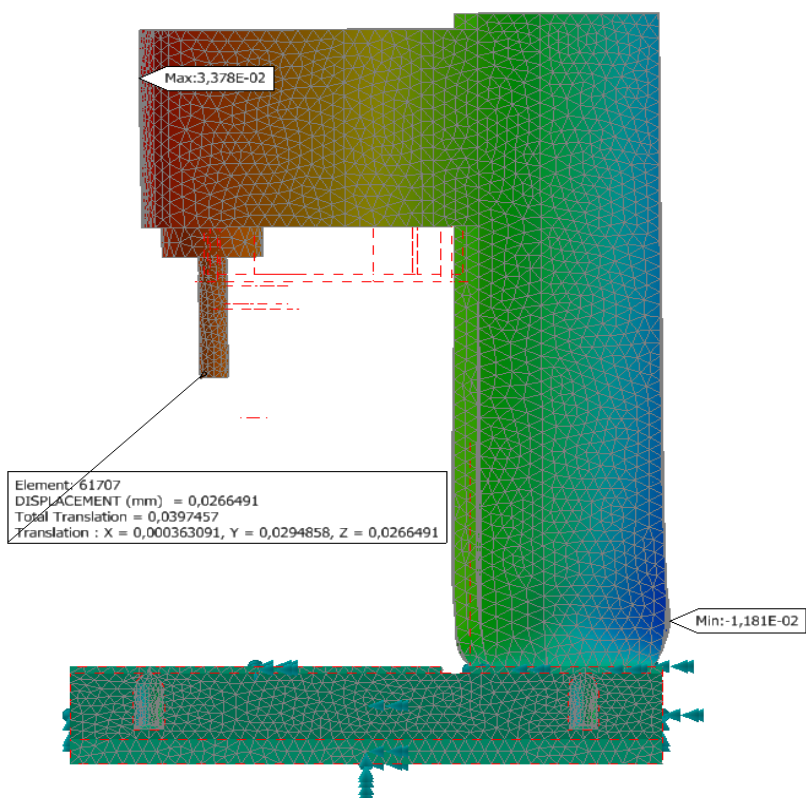
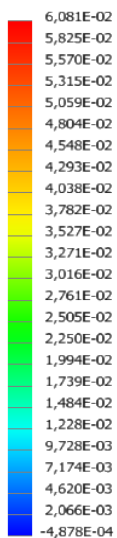


Рис.4.9 Зміщення осі шпинделя по осі Y (Z в моделі)

Displacement ▾ ALONG Y-AXIS ▾ mm ▾ ⚙



Y
X

CONTOUR: DISPLACEMENT (mm) (TY)
DEFORMED TOTAL: (MIN=0, MAX=0,0669305)
OUTPUT SET: SUBCASE 2

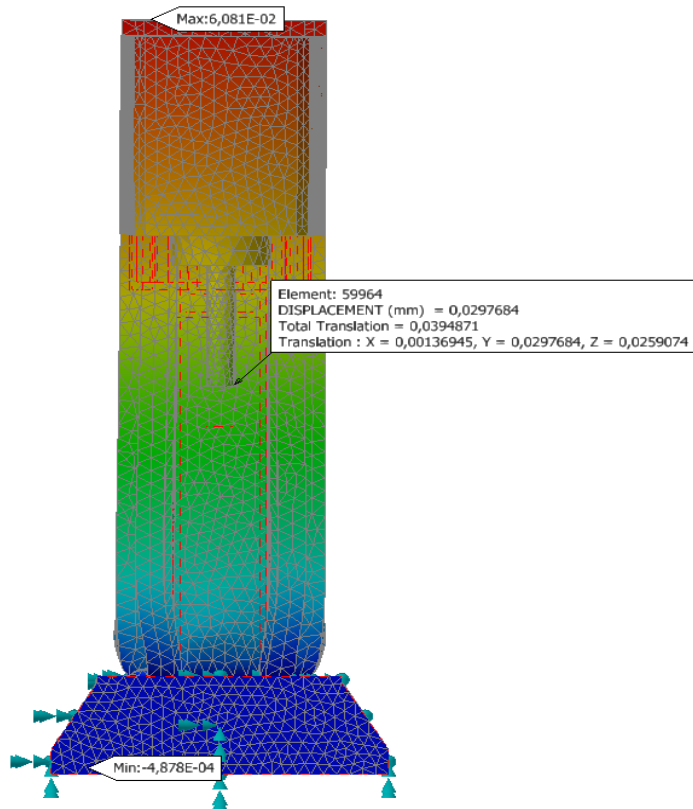


Рис.4.10 Зміщення відносно осі X

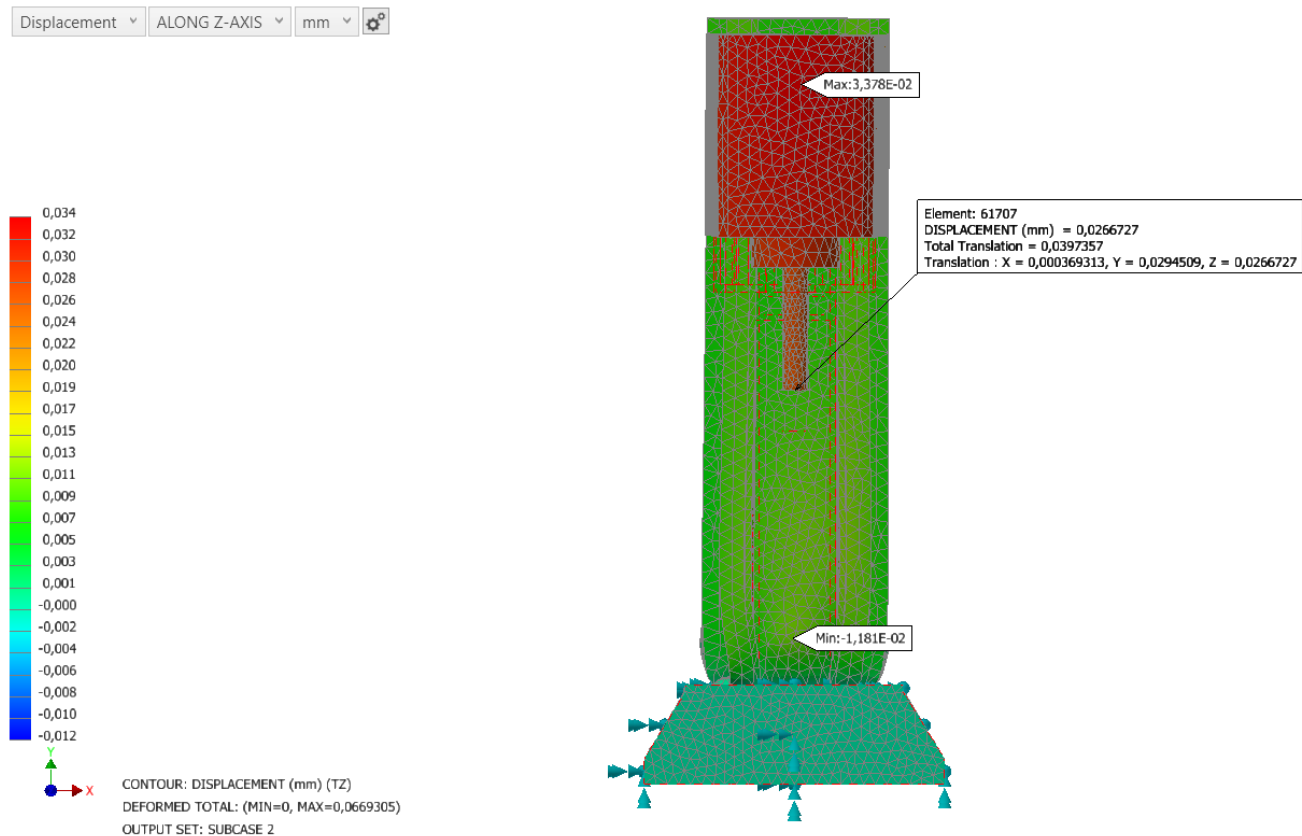


Рис.4.11 Зміщення по осі Z (У в моделі)

Останній етап розрахунку – створення необхідних діаграм та їх подальший аналіз, в разі необхідності можна експортувати отримані результати.

4.3 Висновки по розділу

Отримані результати при 3D моделюванні корелюються з отриманими даними проведеного експерименту та даними з експериментальних досліджень відомими з інформаційних джерел, що підтверджує адекватність запропонованої 3D моделі шпиндельного вузла верстату Proxxon MF70. За результатами моделювання можна зробити такі висновки:

1. Зміщення по осі Y отримане під час експерименту та під час моделювання має невелику різницю (0.025 та 0.029 відповідно);
2. Зміщення по осі X отримане під час експерименту та під час моделювання суттєво відрізняється (0.008 та 0.0013). Це пояснюється

тим, що кріплення індикатора було не достатньо жорстке, тому що деякі деталі виготовлялися з пластику, а також це залежить від стану самого індикатора, оскільки під час вимірів були деякі проблеми.

3. Отримане розрахункове зміщення шпинделя по осі Z складає 0.026, що не виходить за межі точності верстату.

Виходячи з вище сказаного можна зробити висновок, що натурний експеримент був правильно сплановано та проведено, але жорсткість стойки для кріплення індикаторів необхідно підвищити. Крім цього, треба провести перевірку індикатора який стояв в площині OX , бо є достатні розбіжності між розрахунками та вимірами.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ ПО РОБОТІ

В дисертації на отримання ступеня магістра було зроблено наступне:

1. Обґрунтована доцільність і актуальність теми та поставленої мети.
2. Виконано інформаційно-аналітичне дослідження процесу теплоутворення у шпиндельній бабці мікрофрезерного верстату, розглянуті теплові джерела та можливі методи компенсації як тепловиділення, так і теплових деформацій.
3. Проаналізовано різні варіанти методик експериментів для вивчення теплового стану фрезерних та токарних верстатів.
4. Розроблено методику дослідження теплового стану мікрофрезерного верстата.
5. Визначено характерні точки, в яких необхідно вимірювати температуру, вибрано термодатчик, та реалізовано програмне забезпечення на базі мікроконтролера Arduino Mega для використання комутатора та датчиків.
6. Визначено, відносно яких осей необхідно вимірювати зміщення кінця шпинделя. Обрані індикатори часового типу, спроектовані і виготовлені засоби для встановлення датчика та необхідного кріплення індикаторів з врахуванням особливостей конструкції верстата.
7. Розроблена методика експерименту для визначення часу стабілізації температури передньої та задньої опор, двигуна приводу головного руху та вертикальної стойки та для вимірювання відхилень шпинделя.
8. Проведені експерименти для визначення часу стабілізації при різних частотах обертання шпинделя та отримали відхилення шпинделя відносно осей X та Y.
9. Для підтвердження адекватності розробленої моделі теплового процесу з використанням отриманих у натурному експерименті даних було проведено віртуальний експеримент який показав наступне:

- отримані відхилення шпинделя при підвищенні температури не виходить за обіцяну виробником точність верстату.
- значення відхилень паралельно осі Y в натурному та віртуальному експериментах мають невелику різницю (0.025 мм та 0.029 мм відповідно). Це означає що результати експеримента є адекватними, а методика експеримента правильна та кріплення має достатньою жорсткість.
- значення відхилень відносно осі X в натурному експерименті та віртуальному мають суттєву розбіжність (0.008 мм та 0.0013 мм відповідно). Це можна пояснити тим, що кріплення індикатора має не достатню жорсткість, тобто наявне відхилення індикатора при вимірах.
- відхилення по осі Z було розраховано програмним забезпеченням Autodesk Inventor Nastran 2020 та становить 0.026 мм.

Таким чином, у роботі розроблено і підтверджено модель теплового процесу, яку можна використовувати для визначення теплового стану малогабаритного верстату Proxxon MF70 у разі його модернізації, наприклад, встановлення електродвигунів і відповідної системи керування замість ручної подачі або у разі вибору відповідних способів компенсації теплових переміщень.

Література

1. Резников А. Н., Резников Л. А. Тепловые процессы в технологических системах: Учебник для ВУЗов по специальностям «Технология машиностроения» и «Металлорежущие станки и инструменты». – М.: Машиностроение, 1990. - 288 с.: ил.
2. Шевченко О.В. Звіт з науково-дослідної роботи
3. Фролов А.В. Повышение точности шпиндельных узлов прецизионных станков методами термоупругого моделирования при заданной их теплоустойчивости: Дис. ...канд. техн. наук. М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2007 – 262 с.
4. Теплофизика механической обработки: Учеб. пособие / А.В. Якимов, П.Т. Слободяник, А.В. Усов. – К.; Одесса: Лыбидь, 1991. – 240 с.
5. Бушуев В. В. Сверхточные станки //Станки и инструмент. - 2000. - №6. - с. 27 - 31; №7 - с. 20 - 23.
6. Потапов В. А. Современное оборудование для сверхскоростной обработки // Станки и инструмент. - 1993.-№5.-с. 36-39
7. Бухман К., Енджиевский Е. Влияние принудительного движения воздуха на термическое состояние станков // Вестник машиностроения. - 1980. - №12.- с. 50-52
8. Гончаров А.Н. Компенсация температурной погрешности станков с ЧПУ на основе коррекции управления движением их рабочих органов. Дисертація к.т.н, Оренбург 2018.
9. Stabilization of Machining Precision in Non-Temperature Controlled Factories (MVR series): Machine Tool. [Електронний ресурс]. URL: http://www.mhi-global.com/products/detail/ind_mt_sol_non-temperature.html - 1.03.2013.
10. Manageable deformation – Accurately controlled. [Електронний ресурс]. URL: <http://www.okuma.co.jp/english/onlyone/thermo/index.html>, free. – Caption from title screen (access date 11.05.2015 p.).

11. Thermo Friendly Concept. [Электронный ресурс]. URL: <http://www.okuma.com/thermo-friendly-concept> (access date 15.05.2015 p.).
12. Сегида А.П. Расчет и исследование температурных полей и температурных деформаций металлообрабатывающих станков: Дис. ...канд. техн. наук. - М.: ЭНИМС, 1984 - 191 с.
13. Фролов А.В. Повышение точности шпиндельных узлов прецизионных станков методами термоупругого моделирования при заданной их теплоустойчивости: Дис. ...канд. техн. наук. М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2007 – 262 с.
14. Самохвалов Е. И., Левина З.М. Температурный анализ шпиндельных узлов токарных станков средних размеров//Станки и инструмент. – 1985. - №11. – С.17-19
15. Мурзаков Х.Е. Влияние температурной деформации токарно-револьверных станков на точность обработки: Самарский государственный технический университет, УДК 621.941
16. Керівництво з експлуатації Proxxon MF70.
17. Melexis - MLX90614. [Электронный ресурс]. URL: <https://arduino.ua/prod1431-modyl-beskontaktnogo-termmetra-mlx90614>
18. Arduino MEGA [Электронный ресурс]. URL: <http://arduino.ua/ru/hardware/ADK>
19. Arduino [Электронный ресурс]. URL: <https://www.arduino.cc>
20. Поляков, А. Н. Управление термдеформационным состоянием станка на основе автоматизации прогнозирования температурных перемещений исполнительных органов: учебное пособие /А. Н. Поляков, К. В. Марусич. - Оренбург: Университет, 2012. - 223 с.

Перелік публікацій автора

1. Даниленко О.В., Яхно А.С. Дослідження віброакустичних характеристик металорізальних верстатів// Матеріали міжнародної науково-технічної конференції “Дні науки”, Чехія 22-30 березня 2016 р.
2. Даниленко О.В., Яхно А.С. Моделювання динамічних процесів в механічних системах, Чехія 2016 р.
3. Верба І.І., Яхно А.С. Електродвигун головного руху// Журнал інженерних наук: нотатки молодого вченого.- Суми: Сумський державний університет. – 2016.№1.
4. Верба І.І., Яхно А.С. Деякі особливості розрахунків режимів навантаження багатоцільових верстатів. // “Комплексне забезпечення якості технологічних процесів та систем”: Матеріали тез доповідей VI міжнародної науково-практичної конференції.- Чернігів: ЧНТУ, 2016
5. Даниленко О.В. Яхно А.С. Розширення технологічних можливостей мікрофрезерного верстата, тези доповідей Всеукраїнської науково-технічної конференції молодих вчених та студентів «Інновації молоді – машинобудуванню» м. Київ, травень 2017 р.
6. Verba I. Danylenko O, Yakhno A. Machine-Building Technical Exclusion: Trends, Perspectives, Ways. Perspective Technologies and Devices, Luzk, 2018

ДОДАТКИ

Програмний код для роботи 4-х датчиків температури MLX90614 за допомогою комутатора TCA9548A на базі мікроконтролера Arduino Mega

```
/*Чотири датчика*/  
#include <Wire.h>  
#include <Adafruit_MLX90614.h>  
#define TCAADDR 0x70  
Adafruit_MLX90614 mlx1 = Adafruit_MLX90614();  
Adafruit_MLX90614 mlx2 = Adafruit_MLX90614();  
Adafruit_MLX90614 mlx3 = Adafruit_MLX90614();  
Adafruit_MLX90614 mlx4 = Adafruit_MLX90614();  
void tcaselect(uint8_t i) {  
  if (i > 7) return;  
  Wire.beginTransmission(TCAADDR);  
  Wire.write(1 << i);  
  Wire.endTransmission();  
}  
void setup() {  
  Serial.begin(9600);  
  Serial.println("Adafruit MLX90614 test");  
  Serial.println();  
  Serial.print("Передня опора");  
  Serial.print(" ");  
  Serial.print("Задня опора");  
  Serial.print(" ");  
  Serial.print("Вертикальная стойка");  
  Serial.print(" ");
```

```

Serial.print("Двигатель");
/* Initialise the 1st sensor */
tcselect(0);
if(!mlx1.begin())
{
  /* There was a problem detecting the HMC5883 ... check your connections */
  Serial.println("Ooops, no MLX90614 detected ... Check your wiring!");
  while(1);
}
/* Initialise the 2st sensor */
tcselect(1);
if(!mlx2.begin())
{
  /* There was a problem detecting the HMC5883 ... check your connections */
  Serial.println("Ooops, no MLX90614 detected ... Check your wiring!");
  while(1);
}
/* Initialise the 3st sensor */
tcselect(7);
if(!mlx3.begin())
{
  /* There was a problem detecting the HMC5883 ... check your connections */
  Serial.println("Ooops, no MLX90614 detected ... Check your wiring!");
  while(1);
}
/* Initialise the 4st sensor */
tcselect(2);
if(!mlx4.begin())

```



```

{
  /* There was a problem detecting the HMC5883 ... check your connections */
  Serial.println("Ooops, no MLX90614 detected ... Check your wiring!");
  while(1);
}
}

void loop() {
  Serial.println();
  tcselect(0);
  /*Serial.print("Передняя опора = ");*/
  Serial.print((int)mlx1.readObjectTempC());
  Serial.print(" ");
  tcselect(1);
  /*Serial.print("Задняя опора = ");*/
  Serial.print((int)mlx2.readObjectTempC());
  Serial.print(" ");
  tcselect(7);
  /*Serial.print("Вертикальная стойка = ");*/
  Serial.print((int)mlx3.readObjectTempC());
  Serial.print(" ");
  tcselect(2);
  /*Serial.print("Запасной датчик = ");*/
  Serial.print((int)mlx4.readObjectTempC());
  delay(60000);
}

```

Додаток Б

Протоколи проведених випробувань верстата Proxxon MF 70

Протокол випробувань верстата

Визначення температури вузлів верстата

Частота обертання шпинделя: 16000 об/хв

Дата: 14.04.19

Час: 15:58

Дискретність вимірів: 0.0000

Початкова температура: 18, 18, 18, 9

Час	Передня опора	Задня опора	Вертикальна стойка	Двигун
	18	18	18	19
	19	19	18	22
	19	20	18	24
	20	21	19	26
	21	22	19	28
	22	22	19	29
	22	23	20	30
	23	24	20	30
	23	25	20	31
	24	25	21	31
	24	26	21	32
	25	26	22	32
	25	26	22	32
	25	27	22	32
	25	27	22	32
	26	27	23	33
	26	27	23	33
	26	27	23	33
	26	27	23	33
	26	28	23	33
	26	28	24	33
	26	28	24	33
	26	28	24	33
	26	28	24	33
	26	28	24	33
	26	28	24	33
	27	28	24	33
	27	28	24	33
	27	28	24	33

Протокол випробувань верстата

Вимірювання зміщення шпинделя

Частота обертання шпинделя: $20000 \frac{1}{\text{хв}}$

Дата: 21.05.19

Час: 19:12

Дискретність вимірів: 60000

Початкова температура: $20^{\circ}\text{C}; 20^{\circ}\text{C}; 20^{\circ}\text{C}; 20^{\circ}\text{C}$

Початкові точки:

X:

Y:

